



# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

## **FACULTAD DE CIENCIAS**

### **ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

## **DESARROLLO DE UNA INGENIERÍA CONCEPTUAL PARA EL PROCESO DE PIRÓLISIS TÉRMICA DE RESIDUOS PLÁSTICOS DE POLIPROPILENO Y POLIESTIRENO**

### **“TRABAJO DE TITULACIÓN”**

#### **TIPO: PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

Presentado para optar por al grado académico de:

#### **INGENIERO QUÍMICO**

**AUTOR: OSCAR GEOVANNY PINAJOTA ILBAY**

**TUTOR: ING. PAÚL GUSTAVO PALMAY PAREDES**

**RIOBAMBA – ECUADOR**

**2018**

© **2018**, Oscar Geovanny Pinajota Ilbay

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando reconozca el Derecho de Autor.

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

Los miembros del Trabajo de Titulación certifican que, el trabajo técnico titulado **“DESARROLLO DE UNA INGENIERÍA CONCEPTUAL PARA EL PROCESO DE PIRÓLISIS TÉRMICA DE RESIDUOS PLÁSTICOS DE POLIPROPILENO Y POLIESTIRENO”**, de responsabilidad del Señor Oscar Geovanny Pinajota Ilbay con número de CI: 060354875-1, ha sido minuciosamente revisado por los miembros del tribunal del Trabajo de Titulación, quedando autorizada su presentación.

<b>NOMBRE</b>	<b>FECHA</b>	<b>FIRMA</b>
Ing. Paúl Gustavo Palmay Paredes	6 Julio 2018	.....
<b>DIRECTOR DEL</b>		
<b>TRABAJO DE TITULACIÓN</b>		
Ing. Mabel Mariela Parada Rivera	6 Julio 2018	.....
<b>MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE</b>		
<b>TRABAJO DE TITULACIÓN</b>		
Ing. Danielita Fernanda Borja Mayorga	6 Julio 2018	.....
<b>MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE</b>		
<b>TRABAJO DE TITULACIÓN</b>		

“Yo OSCAR GEOVANNY PINAJOTA ILBAY soy responsable de las ideas y resultados expuestos en este Trabajo de Titulación, y el patrimonio intelectual del Trabajo de Titulación pertenecen a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo”

---

*Oscar Geovanny Pinajota Ilbay*

## **DEDICATORIA**

A Dios por mantenerme con vida cada día, por darme salud y sabiduría para poder afrontar los retos que se presentan en los diferentes caminos.

A mis padres, Juan Pinajota y Yolanda Ilbay, por enseñarme a luchar con amor, paciencia y perseverancia, a no darme por rendido por cada uno de mis sueños, que nunca estoy solo en cada una de mis batallas.

A mis hermanos Luis, David y Leticia Pinajota Ilbay, por su comprensión y apoyo incondicional.

De igual manera a Lorena Castillo por el amor incondicional alentándome a la culminación de mis objetivos.

*Oscar Pinajota*

## **AGRADECIMIENTO**

A mis padres, Juan y Yolanda por apoyarme cada una de mis decisiones, por permitirme lograr una de mis metas y por estar siempre ahí para mí.

A la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO, por permitirme llevar a cabo mi tesis de grado, rodeada de profesionales altamente capacitados.

A mi tutor de tesis, Ing. Paúl Palmay y a mi colaboradora, Ing. Mabel Parada por ser maestros capaces de infundir conocimientos de interés durante el transcurso de la carrera; y sobre todo en el desarrollo del presente proyecto final.

*Oscar Pinajota*

## TABLA DE CONTENIDO

	Páginas
<b>RESUMEN</b> .....	XV
<b>SUMMARY</b> .....	XVI
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
1.1. Identificación Del Problema .....	1
1.2. Justificación del proyecto.....	2
1.3. Objetivos de la Investigación .....	4
1.3.1. <i>Objetivo General</i> .....	4
1.3.2. <i>Objetivos Específicos</i> .....	4
<b>CAPÍTULO II</b>	
<b>2. MARCO TEÓRICO</b> .....	5
2.1. Antecedentes de la investigación .....	5
2.2. Marco Conceptual .....	6
2.2.1. <i>Residuos</i> .....	6
2.2.1.1. <i>Residuos Orgánicos</i> .....	7
2.2.1.2. <i>Residuos Inorgánicos</i> .....	7
2.2.2. <i>Factores que influyen el en aumento de residuos.</i> .....	7
2.2.2.1. <i>Aumento de la población</i> .....	7
2.2.2.2. <i>Acumulación de la población en zonas confinadas</i> .....	8
2.2.2.3. <i>La industrialización</i> .....	8
2.2.2.4. <i>Nivel social</i> .....	9
2.2.3. <i>Polímeros</i> .....	9
2.2.4. <i>Plásticos</i> .....	9
2.2.4.1. <i>Historia del plástico</i> .....	10
2.2.4.2. <i>Usos y demanda de los plásticos</i> .....	11
2.2.4.3. <i>Clasificación de los plásticos</i> .....	12
2.2.4.4. <i>Plásticos reciclables</i> .....	14

<b>2.2.5.</b>	<b><i>Polipropileno</i></b> .....	15
<b>2.2.6.</b>	<b><i>Poliestireno</i></b> .....	16
<b>2.2.7.</b>	<b><i>Tratamiento de Residuos Solidos</i></b> .....	17
<b>2.2.7.1.</b>	<b><i>Tratamientos Físicos</i></b> .....	18
<b>2.2.7.2.</b>	<b><i>Tratamientos químicos</i></b> .....	18
<b>2.2.7.3.</b>	<b><i>Tratamientos biológicos</i></b> .....	19
<b>2.2.8.</b>	<b><i>Técnicas de reciclaje del plástico</i></b> .....	19
<b>2.2.9.</b>	<b><i>Reciclaje de polímeros</i></b> .....	19
<b>2.2.9.1.</b>	<b><i>Reciclaje primario</i></b> .....	20
<b>2.2.9.2.</b>	<b><i>Reciclaje secundario</i></b> .....	20
<b>2.2.9.3.</b>	<b><i>Reciclaje terciario</i></b> .....	20
<b>2.2.9.4.</b>	<b><i>Reciclaje cuaternario</i></b> .....	21
<b>2.2.10.</b>	<b><i>Técnicas de recuperación de plásticos</i></b> .....	21
<b>2.2.10.1.</b>	<b><i>Recolección y selección</i></b> .....	21
<b>2.2.10.2.</b>	<b><i>Técnica de reciclaje mecánico</i></b> .....	22
<b>2.2.10.3.</b>	<b><i>Técnica de reciclaje químico</i></b> .....	22
<b>2.2.11.</b>	<b><i>Hidro craqueo</i></b> .....	23
<b>2.2.12.</b>	<b><i>Gasificación</i></b> .....	24
<b>2.2.13.</b>	<b><i>Cracking o Pirólisis de los plásticos</i></b> .....	25
<b>2.2.14.</b>	<b><i>Craqueo catalítico de los residuos plásticos</i></b> .....	25
<b>2.2.15.</b>	<b><i>Craqueo térmico de los residuos plásticos</i></b> .....	26
<b>2.2.16.</b>	<b><i>Factores que influncian en el proceso de pirólisis térmica</i></b> .....	27
<b>2.2.16.1.</b>	<b><i>Efecto de la temperatura en la pirólisis térmica</i></b> .....	28
<b>2.2.16.2.</b>	<b><i>Efecto sobre la velocidad de Calefacción</i></b> .....	29
<b>2.2.16.3.</b>	<b><i>Efecto de la presión sobre la pirólisis térmica</i></b> .....	30
<b>2.2.16.4.</b>	<b><i>Efecto de la humedad sobre la pirólisis térmica</i></b> .....	30
<b>2.2.16.5.</b>	<b><i>Efecto del tiempo de residencia</i></b> .....	31
<b>2.2.16.6.</b>	<b><i>Efecto del tamaño de la partícula plástica en la pirólisis térmica</i></b> .....	31
<b>2.2.16.7.</b>	<b><i>Efecto de la materia prima utilizada en la pirólisis térmica</i></b> .....	32
<b>2.2.16.8.</b>	<b><i>Efecto del tipo de reactor en la pirólisis térmica</i></b> .....	32



<b>2.2.17.</b>	<b><i>Mecanismo de degradación pirolítica térmica</i></b>	36
<b>2.2.17.1.</b>	<i>Etapa de Iniciación</i>	36
<b>2.2.17.2.</b>	<i>Etapa de Propagación</i>	37
<b>2.2.17.3.</b>	<i>Etapa de Terminación</i>	39
<b>2.2.18.</b>	<b><i>Reacción de descomposición para el poliestireno</i></b>	40
<b>2.2.18.1.</b>	<i>Iniciación</i>	40
<b>2.2.18.2.</b>	<i>Propagación</i>	40
<b>2.2.18.3.</b>	<i>Terminación</i>	41
<b>2.2.19</b>	<b><i>Reacción de descomposición para el polipropileno</i></b>	42
<b>2.2.19.1.</b>	<i>Iniciación</i>	42
<b>2.2.19.2.</b>	<i>Propagación</i>	42
<b>2.2.19.3.</b>	<i>Terminación</i>	42
<b>2.2.20.</b>	<b><i>Energía necesaria para la ruptura de los enlaces en el poliestireno y polipropileno</i></b>	43
<b>2.2.21.</b>	<b><i>Productos generados de la pirólisis térmica</i></b>	44
<b>CAPÍTULO III</b>		
<b>3.</b>	<b>METODOLOGÍA</b>	45
<b>3.1.</b>	Hipótesis y especificación de las variables	45
<b>3.1.1.</b>	<i>Hipótesis general</i>	45
<b>3.1.2.</b>	<i>Hipótesis Específicas</i>	45
<b>3.2.</b>	<b>Identificación de Variables</b>	45
<b>3.2.1.</b>	<i>Variables independientes</i>	45
<b>3.2.2.</b>	<i>Variables dependientes</i>	46
<b>3.2.3.</b>	<i>Variables controladas y no controladas</i>	46
<b>3.3.</b>	<b>Operacionalización de las Variables</b>	47
<b>3.4.</b>	<b>Matriz de consistencia</b>	50
<b>3.5.</b>	<b>Tipo y Diseño de la Investigación</b>	52
<b>3.5.1.</b>	<i>Método Deductivo</i>	52
<b>3.5.2.</b>	<i>Método Inductivo</i>	52
<b>3.5.3.</b>	<i>Método Investigativo</i>	52

3.5.4.	<i>Unidad de Análisis</i> .....	53
3.5.5.	<i>Técnica de Recolección de Datos</i> .....	53
3.5.5.1.	<i>Revisión Bibliográfica</i> .....	53
<b>CAPÍTULO IV</b>		
4.	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	55
4.1.	<b>Análisis de Resultados</b> .....	55
4.1.1.	<i>Esquema de la influencia de la temperatura en la pirolisis térmica</i> .....	55
4.1.2.	<i>Esquema de la influencia del reactor en la pirolisis térmica.</i> .....	59
4.1.3.	<i>Esquema de influencia del tiempo de residencia en la pirolisis térmica</i> .....	60
4.1.4.	<i>Esquema de la influencia del tamaño de la partícula de polimero en la pirólisis térmica.</i> .....	64
4.1.5.	<i>Esquema de la influencia de la materia prima utilizada en la pirólisis termica</i> .....	64
4.1.6.	<i>Esquema de la influencia del uso de catalizador.</i> .....	69
4.2.	<b>Prueba de Hipótesis</b> .....	70
4.2.1.	<i>Hipótesis 1</i> .....	70
4.2.2.	<i>Hipótesis 2</i> .....	73
4.2.3.	<i>Hipótesis 3</i> .....	74
4.2.4.	<i>Hipótesis 4</i> .....	75
4.2.4.1.	<i>Balance de masa</i> .....	77
4.3.	<b>Discusión de Resultados</b> .....	80
<b>CONCLUSIONES</b> .....		83
<b>RECOMENDACIONES</b> .....		84
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>		
<b>ANEXOS</b>		

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

	Páginas
<b>Gráfico 1-2.</b> Consumo de plásticos .....	11
<b>Gráfico 2-2.</b> Producción de fracciones líquidas y gaseosas a temperaturas mayores de 700°C.....	28
<b>Gráfico 1-4.</b> Influencia de la temperatura sobre la pirólisis térmica .....	57
<b>Gráfico 2-4.</b> Rendimiento de la pirólisis térmica a 550°C, 600°C y 650°C .....	59
<b>Gráfico 3-4.</b> Generación de productos en función del tiempo de residencia.....	63
<b>Gráfico 4-4.</b> Rendimiento de las fracciones líquida y gaseosa frente al tiempo de residencia de 5 horas.....	64
<b>Gráfico 5-4.</b> Fracciones líquidas, sólidas y gaseosas del poliestireno, polipropileno y otros compuestos.....	66
<b>Gráfico 6-4.</b> Cantidad de fracciones obtenidos como producto de la pirólisis térmica de polipropileno y poliestireno.....	67
<b>Gráfico 7-4.</b> Cantidad de fracciones obtenidos como producto de la pirólisis térmica de polipropileno y poliestireno con métodos y técnicas adecuadas de reciclaje.....	69
<b>Gráfico 8-4.</b> Cantidad de fracciones obtenidos como producto de la pirólisis térmica de poliestireno con y sin métodos y técnicas adecuadas de reciclaje.....	70
<b>Gráfico 9-4.</b> Cantidad de fracciones obtenidos como producto de la pirólisis térmica de polipropileno con y sin métodos y técnicas adecuadas de reciclaje.....	70
<b>Gráfico 10-4.</b> Relación entre el rendimiento de los productos generados y la temperatura frente a la existencia de catalizador.....	72

## ÍNDICE DE TABLAS

	Páginas
<b>Tabla 1-2.</b> Producción de residuos sólidos para el año 2018 en el Ecuador.....	12
<b>Tabla 2-2.</b> Tipos de Plásticos Reciclables según la SPI.....	14
<b>Tabla 3-2.</b> Propiedades Físico – químicas del polipropileno.....	15
<b>Tabla 4-2.</b> Propiedades Físico – químicas del poliestireno.....	16
<b>Tabla 5-2.</b> Reciclado químico de plásticos .....	22
<b>Tabla 6-2.</b> Tiempo de residencia y sus productos.....	30
<b>Tabla 7-2.</b> Energía de enlace de algunos grupos presentes en polímeros sintéticos .....	43
<b>Tabla 1-3.</b> Identificación de variables independientes.....	45
<b>Tabla 2-3.</b> Identificación de variables dependientes.....	46
<b>Tabla 3-3.</b> Identificación de variables controladas y no controladas.....	46
<b>Tabla 4-3.</b> Operacionalización de las variables dependientes.....	47
<b>Tabla 5-3.</b> Operacionalización de las variables independientes.....	48
<b>Tabla 6-3:</b> Matriz de consistencia.....	50
<b>Tabla 7-3.</b> Matriz bibliográfica.....	53
<b>Tabla 1-4.</b> Esquema de la influencia de la temperatura sobre la pirolisis térmica.....	57
<b>Tabla 2-4.</b> Rendimiento de aceite pirolítico a 550°C, 600°C y 650 °C.....	58
<b>Tabla 3-4.</b> Influencia del tipo de reactor utilizado en pirolisis Térmica.....	61
<b>Tabla 4-4.</b> Esquema de la influencia del tiempo de residencia en la pirólisis térmica.....	62
<b>Tabla 5-4.</b> Rendimiento vs tiempo de residencia.....	63
<b>Tabla 6-4.</b> Datos reales obtenidos de la pirólisis térmica.....	65

<b>Tabla 7-4.</b> Comparativa de los resultados acoplados a la realidad del Ecuador sin técnicas o métodos de reciclaje.....	66
<b>Tabla 8-4.</b> Producción de compuestos pirolíticos aplicando métodos y técnicas de reciclaje.....	68
<b>Tabla 9-4.</b> Rendimiento de aceite pirolítico a 550°C, 600°C y 650 °C con y sin uso de catalizador.....	71
<b>Tabla 10-4.</b> Ventajas y desventajas de los procesos de reciclaje.....	73
<b>Tabla 11-4.</b> Ventajas y desventajas de los procesos de reciclaje.....	73
<b>Tabla 12-4.</b> Rendimiento de diversos polímeros.....	76
<b>Tabla 13-4.</b> Rendimiento de fracciones en el proceso de pirólisis térmica.....	77
<b>Tabla 14-4.</b> Parámetros teóricos para el proceso de pirólisis térmica de polipropileno con tratamientos adecuados de reciclaje.....	77
<b>Tabla 15-4.</b> Parámetros teóricos para el proceso de pirólisis térmica de poliestireno con tratamientos adecuados de reciclaje.....	78
<b>Tabla 16-4.</b> Datos del balance de masa global para los polímeros (PS y PP).....	80
<b>Tabla 17-4.</b> Parámetros teóricos para el proceso de pirólisis térmica de poliestireno sin tratamientos adecuados de reciclaje.....	80
<b>Tabla 18-4.</b> Matriz comparativa, selección de los rangos óptimos para el proceso de pirólisis térmica de polipropileno y poliestireno con la aplicación de técnicas de reciclado.....	84
<b>Tabla 19-4.</b> Matriz comparativa, selección de los rangos óptimos para el proceso de pirólisis térmica de polipropileno y poliestireno sin la aplicación de técnicas de reciclado.....	84

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

**Anexo A** Reactores Químicos

**Anexo B** Reactores Químicos

**Anexo C** Reactores Químicos

**Anexo D** Reactores Químicos

**Anexo E** Esquema de la pirólisis Térmica

**Anexo F** Polipropileno y poliestireno

**Anexo G** Costo de implementación de un reactor Batch para la pirolisis térmica de polipropileno y poliestireno adaptado a las variables de mayor rendimiento teórico

## **RESUMEN**

La investigación tuvo como objetivo desarrollar una ingeniería conceptual para el proceso de pirólisis térmica de residuos plásticos de polipropileno y poliestireno lo que permitirá determinar la mejor tecnología para las condiciones de operación del proceso pirólítico. El método empleado para la investigación fue la recopilación bibliográfica junto con la interpretación de resultados obtenidos en varios estudios afines. Los parámetros analizados fueron Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), Presión (atm), Velocidad de calefacción (kw/s), Tiempo de residencia (h), Composición de la materia prima (polipropileno y poliestireno), Tipo de reactor (batch), Fracciones obtenidas (%). Se determinó que el reactor con mejor rendimiento global es el de tipo batch de tanque agitado, a partir de una alimentación de 0.5 kg/s, con un 78%, cuyas fracciones son del 76.16% para el líquido, 4.3% para el gas y 19.512% para el coque. Se analizó las tecnologías existentes del proceso de pirólisis obteniendo los mejores rendimientos de fracciones líquidas 68.55% para el poliestireno y 47.18% de polipropileno en un tiempo de retención del material menor a 30 minutos con una eficiencia del proceso pirólítico del 87% siempre que se realice tratamientos previos de reciclado, por otra parte al no realizar dichos tratamientos la composición de líquidos es de 25.07% y 28.11% respectivamente por la presencia de contaminantes y otros polímeros. La pirólisis térmica se puede utilizar en todo el campo de recuperación de compuestos poliméricos plásticos pues es un método muy eficiente de alto rendimiento que requiere del control de las variables de operación independientes para obtener el producto deseado.

**PALABRAS CLAVE:** <INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA QUÍMICA> <APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS PLÁSTICOS> <PIRÓLISIS TÉRMICA> <POLIPROPILENO> <POLIESTIRENO> <CONDICIONES OPERACIONALES> <TIEMPO DE RETENCIÓN> <REACTOR TIPO BATCH> <TEMPERATURA>

## SUMMARY

The objective of the research was to develop a conceptual engineering for the thermal pyrolysis process of polypropylene and polystyrene plastic waste, which will allow to determine the best technology for the operating conditions of the pyro-lithic process. The method used for the investigation was the bibliographic compilation together with the interpretation of the results obtained in several related studies. The parameters analyzed were Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ), Pressure (atm), Heating speed (Kw/s) and Residence time (h), Composition of the raw materials (polypropylene and polystyrene), Type of the reactor (batch), Fraction obtains (%). It was determined that the reactor with the best overall performance in batch-type tank angled, from a feed of 0.5 kg/s, with 78%, whose fractions are 76.16% for the liquid, 4.3% for the gas and 19.512% for coke. The existing technologies of the pyrolysis process were analyzed obtaining the best yields of liquid fraction 68.55% for polystyrene an 47.18% polypropylene in a material retention time of less than 30 minutes with an efficiency of the pyrolytic process of 87% whenever it is carried out previous treatments of recycling, on the other hand to not make such treatments the composition of liquids is 25.07% and 28.11% respectively for the presence of contaminants and other polymers. Thermal pyrolysis can be used throughout the field of recovery of plastic polymer compounds because it is a very efficient high performance method that requires the control of independent operation variables to obtain the desired product.

**KEY WORDS:** <CHEMICAL ENGINEERING AND TECHNOLOGY> <PLASTIC WASTE UTILIZATION> <THERMAL PYROLYSIS> <POLYPROPYLENE> <POLYSTYRENE> <OPERATIONAL CONDITIONS> <RETENTION TIME> <BACTH TYPE REACTOR> <TEMPERATURE>



## **CAPITULO I**

### **1. INTRODUCCIÓN**

#### **1.1. Identificación Del Problema**

El Ecuador al pertenecer a uno de los territorios más ricos en cuanto se refiere a recursos naturales, minerales, sociales, entre otros, se ha visto en la necesidad de desarrollar un crecimiento exponencial en cuanto a su tecnología, investigación, cultura, economía, turismo, educación, política, salud, etc.

Resultado de este crecimiento acelerado la sociedad se ha visto en la necesidad de extraer cada vez más recursos causando la insostenibilidad de los mismos y un problema aun mayor que conocido comúnmente como la generación de residuos sólidos, gaseosos y líquidos. Dichos residuos han ocasionado serios problemas medioambientales como la contaminación de efluentes hídricos, desertificación, erosión, etc. (Frers C, 2009).

Los procesos naturales y aquellos generados por la humanidad se basan en un diagrama muy simple en el que se da la transformación de materia prima en producto elaborado, de forma natural la vegetación obtiene minerales del suelo que a través de la fotosíntesis produce su alimento vital, de igual manera lo realiza la humanidad de forma artificial tras un sin número de operaciones de transformación hasta obtener productos como: combustibles, joyería, detergentes, alimentos, conservas, vestimenta, insumos farmacéuticos medicina, derivados de petróleo, etc.

Todos los productos son generalmente empacados o envasados en recipientes plásticos dependiendo de su característica y propiedades. Una vez consumido el producto, sus desechos se los conoce como residuos, los mismos que son almacenados y transportados para su disposición final.

La disposición final de los residuos depende de su estado general, manejo, origen, composición químico-biológico, efectos socio ambiental (Coyago E et. al, 2016). Generalmente los residuos son transportados a rellenos sanitarios locales que tras varios años en actividad y por en gran

incremento de la sociedad provocan saturación convirtiéndolos en focos de riesgo potenciales, la acumulación de residuos ha provocado gran preocupación en la sociedad pues según cifras proporcionadas por parte del Ministerio del Ambiente de Ecuador (MAE), en su Programa Nacional de Desechos Sólidos del año 2017, una persona produce de media 0,73Kg/día de desechos sólidos (urbanos e industriales) (Quishpe A, 2017).

Tomando en consideración la población actual del Ecuador para el año 2018 de 16'783,322 habitantes (Country Meters, 2018), la producción anual de desechos sólidos será aproximadamente de 4'410,657.022 ton/año. Si se considera la densidad promedio de los residuos de 200 Kg/m<sup>3</sup> (Sukurai K, 2000), se requerirá un volumen de 22'053,285.11 m<sup>3</sup> para almacenar los residuos.

De esta cantidad de residuos se considera que el 11% son desechos plásticos, 61 % residuos de origen orgánico. 9.4% papel y sus derivados, 2.6 % vidrio, 2.2 Metales varios y 13.3 % otros residuos (Quishpe A, 2017).

En el Ecuador los plásticos son la principal forma de almacenamiento pues su versatilidad, flexibilidad, resistencia y bajo costo principalmente han sustituido a los materiales tradicionales en muchas de sus aplicaciones por lo cual la producción de plásticos para abastecer el consumo local ha crecido exponencialmente (Mancheno, 2015).

El estudio se centra específicamente a la recopilación de información para gestionar los residuos plásticos específicamente del polipropileno y poliestireno cuya composición promedio es de 2.578% y 1.132% respectivamente (EMGIRS-EP, 2013), debido a que son los plásticos más utilizados a nivel doméstico e industrial. Así nace la necesidad de realizar la ingeniería conceptual del pirólisis térmico de los plásticos polipropileno y poliestireno, para dar un aprovechamiento a los desechos generados.

## **1.2. Justificación del proyecto**

Los plásticos son uno de los derivados del petróleo más utilizados a nivel doméstico e industrial por lo que su producción cada día crece de manera exponencial. Su bajo costo de producción y sus propiedades físicas lo han hecho ya importante en muchos campos como la construcción, medicina, aviación, almacenamiento, equipo de protección, etc.

La gran demanda actual exige que este producto sea cada vez más resistente y versátil, tras el uso irracional e incontrolado del plástico se lo desecha sin tener en cuenta el gran problema que surge pues al estar compuesto de varios polímeros su degradación varía de entre 150 – 1000 años (Jumarsol, 2016).

La acumulación de los plásticos es un grave problema que con el paso del tiempo llega a contaminar recursos hídricos como ríos, lagos, agua subterránea, etc. El suelo es uno de los más afectados pues la necesidad de más vertederos origina que miles de toneladas de entierren provocando esterilidad en dichas zonas y sus alrededores, en ciertos lugares en los cuales se incinera los plásticos se produce una contaminación excesiva de la atmósfera con gases como el dióxido de carbono, monóxido de carbono, Azufre, amonio, etc., los cuales son tóxicos y nocivos causando en el peor de los casos la muerte de animales y personas (AL Salem S.M., 2017).

La necesidad del desarrollo de la ingeniería conceptual plantea una recopilación bibliográfica para el análisis comparativo de las nuevas tecnologías existentes en la pirólisis térmica de plásticos, con el fin de establecer las condiciones de operacionalidad ajustadas a la realidad del país, reduciendo los niveles de contaminación.

La realización de una ingeniería conceptual es fundamental ya que facilita el desarrollo de esquemas de proceso, estimación de costos, los resultados obtenidos se representarán en matrices comparativas entre cada tecnología, se podrá seleccionar el proceso que represente la mayor eficiencia, rentabilidad, flexibilidad, facilidad operacional y su costo de implementación. Con ello se pretende proponer el método más adecuado para el tratamiento de los desechos plásticos, así como reducir el nivel de contaminación.

La necesidad como ingenieros químicos para solucionar uno de los problemas que más afecta en la actualidad y causa graves enfermedades, a su vez recuperar recursos reduciendo la excesiva explotación de materia prima y lo que conlleva sus operaciones. Además de ampliar el estudio para la pirólisis térmica de polipropileno y poliestireno debido a que existen muy pocas investigaciones sobre el tema, siendo los plásticos que más se utilizan.

### **1.3. Objetivos de la Investigación**

#### ***1.3.1. Objetivo General***

- Desarrollar una ingeniería conceptual para el proceso de pirólisis térmica de residuos plásticos de polipropileno y poliestireno.

#### ***1.3.2. Objetivos Específicos***

- Analizar las nuevas tecnologías, y las existentes para los procesos de pirólisis térmica de los plásticos polipropileno y poliestireno.
- Construir matrices comparativas y de evaluación de las diferentes tecnologías y procesos existentes para la pirólisis térmica.
- Analizar las condiciones de operación del proceso pirolítico y determinar los costos de implementación.

## **CAPITULO II**

### **2. MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. Antecedentes de la investigación**

Según el Ministerio del Ambiente de Ecuador (MAE), A través de su Programa Nacional de Desechos Sólidos del año 2017, la producción de residuos sólidos a nivel doméstico e industrial una persona de clase media produce alrededor 0,73Kg/día de desechos sólidos (Quishpe A, 2017). Por lo que la producción anual de desechos sólidos será aproximadamente de 4'410,657.022 ton/año para una población media de 16'783,322 habitantes en Ecuador (Country Meters, 2018).

De esta cantidad de residuos se considera que el 11% son desechos plásticos, 61 % residuos de origen orgánico, 9.4% papel y sus derivados, 2.6 % vidrio, 2.2 Metales varios y 13.3 % otros residuos. (Quishpe A, 2017). Es decir que 485,172.27 ton/año se compone de plástico en general.

El estudio es específicamente para residuos plásticos de polipropileno y poliestireno cuya composición promedio es de 2.578% y 1.132% respectivamente (EMGIRS-EP, 2013), debido a que son los plásticos más utilizados a nivel doméstico e industrial. Resultando en un total de 12,507.74 ton/año de polipropileno y 5,492.15 ton/año de poliestireno.

Para satisfacer la demanda actual los plásticos se someten a distintos procesos químicos que mejoran sus propiedades físico – químicas por lo son más difíciles de separar molecularmente, además de contaminarse con agentes externos como polvo, agua, lubricantes, restos alimenticios suponen un estudio específico y minucioso. (Scheirs J y Kaminski W, 2006)

Uno problema muy importante en el Ecuador es la falta de cultura de reciclaje puesto que es en este punto en el que se pierde una cantidad considerable de plásticos o se contaminan de forma irremediable a tal punto que no puede utilizarse para ulteriores procesos. El porcentaje de reciclaje para el año 2014 fue de 31,48%. (INEC, 2016)

La pirólisis es el proceso de descomposición térmica en ausencia de oxígeno, con temperaturas comprendidas entre 400°C y 1000°C, obteniendo una fracción gaseosa, líquida y sólida aprovechables (Aracil I., 2008).

También es referida como craqueo de polímeros ya que son los componentes principales de los plásticos y por su misma estructura química son difíciles de degradar por tal motivo la pirólisis es un excelente método de reciclaje cuyos productos son varios combustibles altamente reutilizables. Gracias a que la pirólisis térmica no es un proceso de incineración no se producen emisiones toxicas por lo que se reduce al mínimo la contaminación.

Este es un proceso el cual se ha utilizado desde hace mucho tiempo atrás, es así que en la década de los 80', se desarrolló en Japón, pirólisis de residuos sólidos urbanos para la producción de electricidad. (CONESA, 1996)

En la actualidad se ha impuesto la opinión de que la termólisis (pirolisis térmica) por degradación térmica de los residuos sólidos, por lo que es una tecnología más atractiva para el avance de un proceso a gran escala, y en el que se traten conjuntamente residuos sólidos de diferente naturaleza sin forzar un elevado rendimiento en la separación selectiva de las materias primas. Además, un proceso de craqueo térmico puede integrarse en la operación de una refinería con el consiguiente ahorro de inmovilizado. (Arandes, et. al, 1999)

Por consiguiente, en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, actualmente se vienen realizando experimentaciones en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ciencias con diferentes tipos de residuos sólidos, obteniéndose resultados favorables mediante la aplicación de pirolisis térmica, controlando presión, temperatura y el tiempo de residencia.

## **2.2. Marco Conceptual**

### **2.2.1. Residuos**

Se conoce a los residuos sólidos como aquellos desechos producto de actividades naturales y artificiales producidas por el ser humano de carácter domésticas e industriales los cuales han

cumplido con su objetivo y ya no son útiles en otro tipo de actividades por consecuencia se convierten en un problema medio ambiental. (Seoánez, 2000)

Los residuos sólidos son el resultado de un conjunto de actividades naturales y humanas, aquellos productos que ya no cumplen con un propósito específico definido sino en un problema ambiental por lo tanto se convierten en desechos. Dichos subproductos indeseados han causado grandes impactos ambientales pues su inadecuada disposición final provoca contaminación, mal olor y los efectos nocivos en la salud. (Castrillón, O; Puerta, S, 2002)

Los residuos sólidos dependiendo de su composición pueden clasificarse en orgánicos o inorgánicos en función de su origen.

#### *2.2.1.1. Residuos Orgánicos*

Los residuos orgánicos se originan directamente de la naturaleza sin sufrir cambios en su estructura a través de procesos industrializados es decir aquellos que son fácilmente biodegradables por acción de microorganismos ya sea por bacterias, hongos, etc. Aquí se encuentran los alimentos, desechos vegetales, etc. (UNESCO, 1997)

#### *2.2.1.2. Residuos Inorgánicos*

Son todos aquellos desperdicios de origen natural los cuales han sufrido cambios en su estructura por lo su descomposición es lenta, que en el peor de los casos lleva varias décadas en el caso del plástico, por este motivo se pueden reutilizar a través de procesos de recuperación mecánicos o químicos reduciendo su efecto en el ambiente como en el caso de: papel y sus derivados, vidrio, metales, cauchos, lubricantes, etc., (UNESCO, 1997).

### **2.2.2. Factores que influyen en el aumento de residuos.**

#### *2.2.2.1. Aumento de la población*

La población es un tema muy importante y se relaciona directamente con la producción de residuos pues para dar abasto se requiere de un incremento en la explotación de recursos, su industrialización y a su vez con ello la generación de desperdicios.

El crecimiento a nivel mundial de la población ha superado las expectativas de muchos científicos pues desde su primer registro en el año de 1950 la media poblacional se estimaba en 2600 millones, pocos años más tarde en 1999 se alcanzó los 5000 millones.

Para el año 2011 se conmemora una población de 7000 millones, el último registro muestra que en el año 2015 ya superábamos los 7300 millones de personas y cada 12 años se incrementa la cifra en 1000 millones (ONU, 2016).

En el Ecuador la media aproximada poblacional para el año 1950 fue de 3.20 millones de habitantes, años después en 1990 la cifra aumento a 9.65 millones y para el año 2010 se elevó a 14.48 millones de habitantes, teniendo en consideración el índice de crecimiento de 1.31% en año 2016, la población actual para el año 2018 ronda los 16'783,322 habitantes (Rivadeneira , L; Zumárraga, M, 2010).

La producción promedio de residuos sólidos para una persona de clase media ronda los 0,73Kg/día de desechos sólidos (Quishpe A, 2017). Por lo que la producción anual de desechos sólidos será aproximadamente de 4'410,657.022 ton/año. Es decir que mientras más acelerado sea el crecimiento poblacional mucha más generación de residuos existirá.

#### *2.2.2.2. Acumulación de la población en zonas confinadas*

Con el aumento de población se genera otro problema que es la aglomeración de personas en áreas específicas como zonas urbanas, residenciales, industriales etc. Además, la expansión de las ciudades para albergar cada vez más habitantes ha provocado que cada día se genere más residuos sólidos y se requiera más suministros.

#### *2.2.2.3. La industrialización*

La industrialización en muchos países ha sido el eje principal en cuanto se refiere a generar economía. Las industrias obtienen sus productos al someter materias primas a varios procesos de transformación, resultado del cual se producen residuos orgánicos e inorgánicos.



#### **2.2.2.4. Nivel social**

En la sociedad se ha distinguido varios grupos de personas que se categorizan por su poder adquisitivo, su nivel de vida elevado, entre otros. Razón por la cual se genera mayores residuos pues la renovación de sus enceres domésticos, tecnológicos, inmobiliarios, automóviles, etc., afecta principalmente con la generación de plástico, papel, cartón, vidrios, caucho, entre otros, pues son sus componentes principales (APME, 2002).

#### **2.2.3. Polímeros**

Los polímeros son macromoléculas o moléculas de gran tamaño unidas por un fuerte enlace covalente. La estructura básica para un polímero se denomina monómero los cuales pueden ser de un solo tipo o varios entrelazados entre sí, dependiendo la funcionalidad del monómero le conferirá una característica específica al polímero, por lo que pueden estar conformados por varias mezcla y proporciones únicas (Martínez G, 1983)

Etimológicamente polímero viene del griego poly que significa muchos, partes, segmento. Por lo que son la estructura mínima de bajo peso molecular que constituye un polímero, su grado de polimerización lo puede transformar en dímero, trímero y sucesivamente, de tal modo que un polímero puede tener un número indeterminado de monómeros (Rivera, 2010).

Los polímeros pueden ser orgánicos cuando su cadena polimérica se basa principalmente en átomos de carbono o polímeros sintéticos cuando su cadena se basa en átomos de silicio. El plástico es uno de los polímeros más utilizados y el cual tiene un periodo de degradación mayor.

#### **2.2.4. Plásticos**

Los plásticos son compuestos elaborados a partir de distintos elementos con estructuras y naturaleza característicos, sus propiedades físico- químicas varían en función de sus componentes y sus proporciones, son muy apetecibles por su flexibilidad, versatilidad, etc., los cuales los han hecho muy utilizados a nivel doméstico e industrial (Martínez G, 1983).

Los plásticos son materiales sintéticos producto de procesos de polimerización de átomos de carbono de gran cadena molecular obtenidos de derivados del petróleo y varios compuestos orgánicos, las propiedades de los plásticos le confieren un fuerte poder aislante contra la temperatura y electricidad además de soportar soluciones químicas con concentraciones ácidas y básicas (Menese J, et. al, 2007).

#### 2.2.4.1. *Historia del plástico*

Desde los inicios de la humanidad, la naturaleza fue la proveedora de recursos, herramientas, utensilios de uso común. Las hojas de los árboles, madera, rocas, eran los materiales principales que por supuesto no satisfacía las exigencias de la época, el hombre en su interés de mejorar cultivo las gomas, ámbar de los árboles coníferos sin saber que eran polímeros y serían los precursores para la industria moderna.

En el año 2000 a.C., los egipcios utilizaban resinas naturales para embalsamar a sus muertos, en Europa en la época medieval se utilizaba la goma “Laca” extraída de una chinche hembra llamada *Lac*. Ya en el año de 1786 con el Diccionario de Química Practica y Teórica se menciona los precursores para la polimerización con la destilación de estorax (*Liquambar orientalis*), un tipo de bálsamo muy cotizado en la época (Gallardo , 1997).

Es en año de 1880 cuando se Thomas Hancock consigue crear el caucho a través de la molienda y mezcla de la goma cruda, el problema surgió al no poder mantener la forma de la sustancia tras su moldeo, tras varios intentos accidentalmente lo vulcanizo con azufre confirmando las características que conocemos actualmente en cuanto a su resistencia y elasticidad (De Cusa, 1979).

La ebonita obtenida en 1851 a nivel industrial después de añadir un 50% de azufre al Caucho por Hancock y Nelson Goodyear, posterior a ello se desarrolló el celuloide tras un desesperado intento de sustituir al marfil para la fabricación de bolas de billar (Richardson & Lokensgard, 2002).

Berzelius en 1847 condensa el primer poliéster tridimensional, años más tarde en 1909 se crea el primer polímero sintético llamado bakelita en honor a su creador tras catalizar ácido fénico y formaldehído gaseoso (Miravete, 1995).

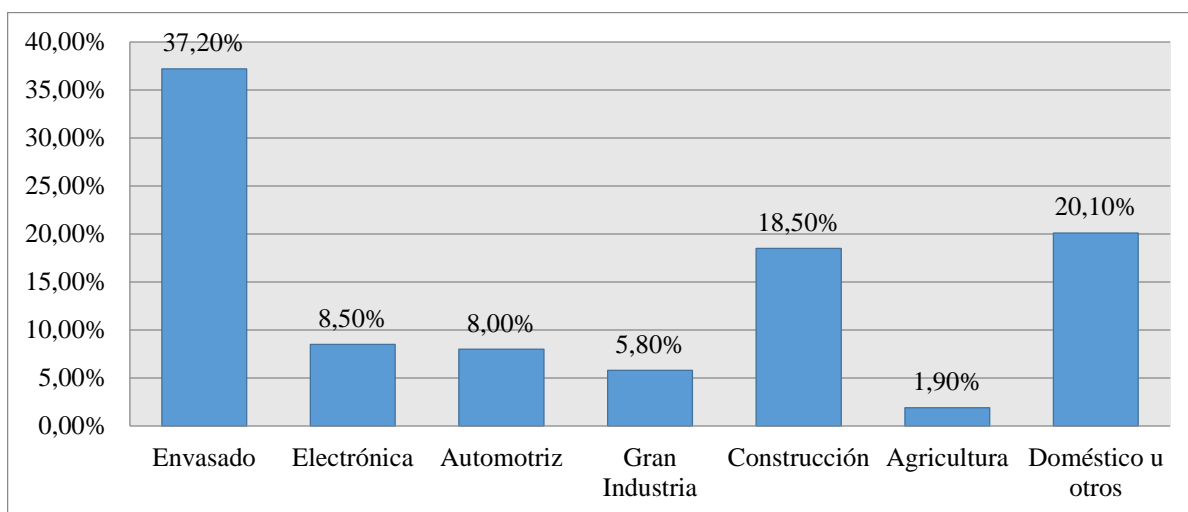
Uno de los momentos clave ocurrió en 1915 cuando se descubre el encadenamiento molecular de los polímeros conocido como copolimerización (Molina, 1995).

En 1935 nace la técnica del termoplástico en donde se crean los polímeros más usados en actualidad como el policloruro de vinilo, poliestireno, poliolefinas, entre las más importantes, la empresa alemana Bayer desarrolla el polipropileno, poliuretanos y sus aplicaciones como adhesivos (Richardson & Lokensgard, 2002).

En la actualidad se han desarrollado varias investigaciones por parte de empresas privadas las cuales han desarrollado superpolímeros pues tienen características y propiedades únicas como conductividad, elevada resistencia radiactiva, polímeros líquidos. La ciencia en este campo se actualiza cada día más y su enfoque en reutilizarlos o disponer adecuadamente sus desechos ha hecho de la industria mundial un ente productivo y ecológico (García, 2008).

#### 2.2.4.2. Usos y demanda de los plásticos

Los plásticos al ser versátiles, elásticos, flexibles, resistentes y por lo general su bajo costo han reemplazado a los materiales utilizados tradicionalmente como el vidrio, aluminio, papel, etc. Pues es mucho más resistente y su costo de manejo mucho menor, por lo que hoy en día el plástico es vital en varios sectores industriales y con ello su existencia en la vida cotidiana.



**Gráfico 1-2.** Consumo de Plásticos

**Fuente:** (Hernández, 2007). Evaluación de la Pirólisis Térmica y Catalítica de Polietileno en Lecho Fluidizado como Técnica de Reciclado. Influencia de las Variables sobre los Productos Generados.

El gráfico 2-1 demuestra el consumo de plástico a nivel industrial y doméstico en todos sus sectores, si calculamos con los índices de producción de residuos sólidos plásticos se tiene:

**Tabla 1-2:** Producción de residuos sólidos para el año 2018 en el Ecuador.

<b>Desechos plásticos</b>	<b>485172.27</b>	<b>ton/año</b>
<b>Sector ocupacional</b>	<b>Consumo de plásticos</b>	<b>Producción anual de residuos ton/año</b>
<b>Envasado</b>	37.20 %	180484.084
<b>Electrónica</b>	8.50 %	41239.643
<b>Automotriz</b>	8.00 %	38813.7816
<b>Gran industria</b>	5.80 %	28139.9917
<b>Construcción</b>	18.50 %	89756.87
<b>Agricultura</b>	1.90 %	9218.27313
<b>Doméstico y otros</b>	20.10 %	97519.6263

**Realizado por:** Oscar Pinajota, 2018.

La tabla 1-2 indica la cantidad de residuos plásticos que se producirán para el año 2018, el sector que mayor producción de desechos origina es el envasado pues su proceso en si requiere de alto consumo de plástico para su transporte y distribución.

#### 2.2.4.3. Clasificación de los plásticos.

El plástico se puede clasificar según el tipo de síntesis, tipo de enlace molecular, componentes químicos, etc. Por lo general se lo suele clasificar por su respuesta térmica y mecánica, cuyo resultado depende de lo mencionado anteriormente. se lo clasifica en:

- Termoplásticos
- Elastómeros
- Termoestables

- *Termoplásticos*

Son aquellas largas cadenas poliméricas lineales relativamente sin enlaces cruzados resultado de la polimerización de monómeros con comportamientos elásticos y dúctiles, es decir que se tienen la capacidad de formar filamentos delgados como hilos. Al someterlos a elevada temperatura pierden dichas propiedades convirtiéndose en un fluido espeso que se recupera al enfriarlo pudiendo repetir el proceso varias veces. Se lo utiliza comúnmente para almacenar alimentos y son muy fáciles de recuperar (Rivera, 2010).

En este grupo tenemos a:

- Policloruro de vinilo (PVC)
- Poliestireno
- Polietileno
- Polipropileno
- 1-Polibuteno

- *Elastómeros*

Son polímeros generalmente constituidos por macromoléculas entrecruzadas ligeramente, con propiedades altamente elásticas a tal punto que puede recuperar su estado original una y otra vez sin efectos en su estructura. No sufre cambios a elevadas temperaturas sino hasta el punto de descomposición química en el cual se transforma en un fluido, además son insolubles en agua con un alto poder de absorción (Frias A, et. al, 2003).

A este grupo pertenecen los:

- Cauchos
- Gomas
- Látex
- Poliisopreno

- *Termoestables*




Un polímero termoestable está constituido por moléculas lineales las cuales al someterse a elevadas temperaturas forman una secuencia de enlaces cruzados que al enfriarse se transforman en sustancias rígidas, duras, con elevada resistencia térmica pero muy frágiles. Uno de los inconvenientes más notables es su dificultad para la recuperación de sus residuos (Hernández, 2007).





- Las resinas
- Plásticos de fenol-formaldehído

#### 2.2.4.4. *Plásticos reciclables*

La Sociedad de la Industria de Plástico (SPI), clasifica los plásticos según el grado de recuperación y tratamiento químico desarrollado con el objetivo de facilitar su reciclaje y establecer el origen del plástico. Por tal motivo los envases contienen tres flechas en forma triangular con un número en su interior que representa a un tipo específico de plástico.

**Tabla 2-2.** Tipos de Plásticos Reciclables según la SPI

Número y simbología	Nombre del plástico y abreviatura	Definición	Utilización
<p>1</p>  <p>PET</p>	Tereftalato de polietileno (PET)	Es un polímero termoplástico que se obtiene por polimerización del ácido tereftálico y el etilenglicol.	Botellas de agua, aceites empaques alimenticios, cintas, etc.
<p>2</p>  <p>HDPE</p>	Polietileno de alta densidad (HDPE)	Es un polímero termoplástico que se obtiene por polimerización del etileno o etano.	Envases de detergente, contenedores de basura, mangueras, bolas plásticas.
<p>3</p>  <p>PVC</p>	Vinilo, Policloruro de Vinilo (PVC)	Es un material termoplástico muy resistente y liviano que se obtiene por la polimerización de cloruro de vinilo $C_2H_3Cl$ .	Tubos, adornos, pisos, revestimientos exteriores para casas y marcos para puertas y ventanas
4	Polietileno de baja	Es un polímero termoplástico	Bolsas de limpieza, recipientes

	densidad (LDPE)	que se obtiene por polimerización del etileno o etano se utiliza principalmente en trabajo que no requieran de gran resistencia y firmeza.	alimenticios, revestimientos, contenedores, empaques six pack
	Polipropileno (PP)	Es un termoplástico obtenido por la polimerización del propileno.	Recipientes para sopas, jarabes, yogurt, partes automotrices, cubiertos plásticos.
	Poliestireno (PS)	Es un polímero termoplástico que se obtiene de la polimerización del estireno	Recipientes para comida, empaques, vasos vajilla plástica, bandejas.
	Otros	Incluye las demás resinas y los materiales multicapa. Poliuretano (PU), Acrilonitrilo-butadiestireno (ABS), Policarbato (PC), Biopolimeros.	Contenedores de comida, botellas tipo nalgene.

**Fuente:** (Society of the Plastics Industry, 2010)

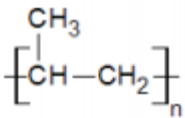
**Realizado por:** Pinajota Oscar, 2018

### 2.2.5. *Polipropileno*

El polipropileno es un termoplástico semicristalino descubierto por primera vez en 1950, se encuentra en el grupo de las poliolefinas y es el material más utilizado a nivel industrial pues tiene una elevada resistencia a soluciones acidas y básicas, al impacto capaz de soportar fuertes presiones lo que lo vuelve muy versátil (Fernández, 2014).

La síntesis de polipropileno se lo realiza con un subproducto de la refinación de la gasolina y por adición polimérica de moléculas de propileno. Las propiedades físico-químicas se detallan en la tabla 3-2.

**Tabla 3-2.** Propiedades Físico – químicas del polipropileno

<b>Polímero</b>	Polipropileno (C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> ) <sub>n</sub>
<b>Símbolo</b>	PP
<b>Método de síntesis</b>	Polimerización por adición
<b>Nivel de Cristalinidad</b>	Alto según su síntesis
<b>Elasticidad</b>	200,000 lb/pulg <sup>2</sup> (1400MPa)
<b>Tensión</b>	5000 lb/pulg <sup>2</sup> (35MPa)
<b>Elongación</b>	varía según los aditivos de 10%-500%
<b>Gravedad Específica</b>	0,9
<b>Temperatura de Transición vítrea</b>	-20°C
<b>Temperatura de fusión</b>	176°C
<b>Estructura</b>	

**Fuente:** (Groover, 1997). Fundamentos de Manufactura Moderna

**Realizado:** Oscar Pinajota, 2018

#### **2.2.6. Poliestireno**

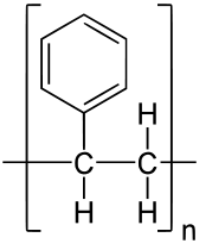
El poliestireno se considera como un termoplástico altamente utilizado, se presenta de forma cristalina, fácil de teñir, amorfa, muy frágil y cambia su estructura a temperaturas menores a los 100°C. Considerado como uno de los más usados en la industrial por su bajo costo de entre 0,15 - 0,40 USD/lb dependiendo de su composición y uso. (Fred, 2004)

Es considerado como un producto inerte químicamente con capacidad de soportar soluciones alcalinas, ácidas, agentes oxidantes y reductores.

El poliestireno es un excelente aislante eléctrico por otro lado su estabilidad se ve afectado por las condiciones atmosféricas y ciertas soluciones de limpieza, aunque se lo puede mejorar añadiendo en su formulación copolímeros para aprovechar su máxima utilidad. Las propiedades físico-químicas se detallan en la tabla 4-2.



**Tabla 4-2.** Propiedades Físico – químicas del poliestireno

<b>Polímero</b>	Poliestireno (C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> ) <sub>n</sub>
<b>Símbolo</b>	PS
<b>Método de síntesis</b>	Polimerización por adición
<b>Nivel de Cristalinidad</b>	Amorfo
<b>Elasticidad</b>	450,000 lb/pulg <sup>2</sup> (3200Mpa)
<b>Tensión</b>	7000 lb/pulg <sup>2</sup> (50MPa)
<b>Elongación</b>	varía según los aditivos de 1%
<b>Gravedad Específica</b>	1,05
<b>Temperatura de Transición vítrea</b>	100°C
<b>Temperatura de fusión</b>	240°C
<b>Estructura</b>	

**Fuente:** (Groover, 1997). Fundamentos de Manufactura Moderna

**Realizado:** Oscar Pinajota, 2018

Según Mesa y Ortiz, (2016). El poliestireno se manufactura en función de su utilidad en dependencia del sector industrial que lo requiera así se tiene poliestireno para usos generales, orientado y de alto impacto, sus aplicaciones son:

- El poliestireno de usos generales se utiliza en el empaque de productos lácteos, cereales, medicamentos, transporte de frutas y verduras, etiquetado, etc.
- El poliestireno de alto impacto se utiliza en la fabricación de recipientes de uso doméstico como bandejas, vajillas, molduras, etc., que tienen una alta resistencia al esfuerzo físico y a la temperatura.

#### **2.2.7. Tratamiento de Residuos Sólidos**

Existen varios métodos de tratamiento y eliminación de residuos sólidos desde el inicio de la civilización humana, aunque en la actualidad se ha convertido en un problema con la gran cantidad

que se generan. Una de las técnicas utilizadas en la actualidad en la industria se conoce como Buenas Prácticas de Manufactura en la que optimiza los recursos y se reduce los desechos principalmente (González, 2005).

Los principales métodos de tratamiento de residuos son:

- Tratamientos físicos
- Tratamientos químicos
- Tratamientos biológicos

#### *2.2.7.1. Tratamientos Físicos*

Los tratamientos físicos son aquellos que no producen cambio o modificación de la estructura química y molecular de los residuos, por lo tanto, separa los residuos en función de su fase, componentes, características, origen, peligrosidad de forma mecánica como:

- Centrifugación
- Filtración
- Sedimentación
- Decantación
- Adsorción y absorción
- Evaporación
- Cribado
- Entre otras.

#### *2.2.7.2. Tratamientos químicos*

Los tratamientos químicos son aquellos en cuales se produce cierta modificación en la estructura molecular de los residuos, transformando relativamente las sustancias peligrosas en componentes estables y manejables.

Entre las que tenemos:

- Oxidación y reducción química
- Tratamientos electroquímicos

- Calcinación o incineración
- Cloración
- Esterilización
- Etc.

#### *2.2.7.3. Tratamientos biológicos*

Los tratamientos biológicos se fundamentan en la utilización de microorganismos para la degradación de ciertos componentes tóxicos reduciendo su índice de contaminación y peligrosidad, los tratamientos biológicos más comunes son:

- Lodos activados
- Lechos bacterianos
- Filtros
- Compostaje
- Digestión aerobia y anaerobia
- Depuración
- Descomposición enzimática

#### *2.2.8. Técnicas de reciclaje del plástico*

Las técnicas de reciclaje son un conjunto de operaciones que se caracterizan por dar uso a los residuos mediante la obtención de energía o productos materiales fruto de la descomposición de ciertos materiales. Tras en gran incremento en la generación de residuos plásticos en los últimos años muchas industrias optan por el reciclaje pues reducen su costo de producción y reducen la huella de carbono (SPI, 1999).

#### *2.2.9. Reciclaje de polímeros*

El reciclaje es una de las técnicas más comunes de recuperación de materias primas, ha sido una práctica muy eficiente para reducir los residuos sólidos, principalmente en plásticos, desde la década de los setenta la solución más común fue la incineración de subproductos plásticos que hasta

en la actualidad se lo sigue realizando, por tal motivo se han desarrollado nuevos métodos para el tratamiento final de estos desechos obteniendo todo su rendimiento (Recycling, 2018).

Las principales técnicas de reciclado son:

- Reciclaje primario.
- Reciclaje secundario.
- Reciclaje terciario.
- Reciclaje cuaternario.

#### *2.2.9.1. Reciclaje primario.*

El reciclaje primario es un proceso mecánico en cual los residuos plásticos se clasifican de acuerdo a su composición y luego son reintroducidos en la línea de producción de plásticos junto con resina virgen de la misma composición, estos productos mantienen características relativamente iguales a sus productos iniciales. Este proceso ocurre principalmente en los residuos termoplásticos gracias a su propiedad de soportar elevadas temperaturas sin modificaciones significativas en su estructura (SPI, 1999).

#### *2.2.9.2. Reciclaje secundario.*

El reciclaje secundario consiste en la transformación de los residuos plásticos en plásticos nuevos con características muy diferentes e inferiores a las originales mediante cambios en su estructura. Dichos productos no pueden tener el uso original de sus predecesores más bien se usan en sectores en los cuales sus características son irrelevantes. Este tipo de reciclaje se utiliza en plásticos termofijos y aquellos contaminados sin necesidad de separación mecánica, los cuales son triturados en pellets u hojuelas para ser introducidos en una nueva línea de producción de plásticos (SPI, 1999).

#### *2.2.9.3. Reciclaje terciario.*

El reciclaje terciario es considerado como un tratamiento químico pues se produce la descomposición molecular de los plásticos en moléculas de menor tamaño como combustibles ligeros de cadena carbonada corta, monómeros básicos o gases como monóxido de carbono e hidrogeno, utilizados como fuente de materias primas, conocido comúnmente como pirólisis (Gonzáles, 2005).

#### **2.2.9.4.    *Reciclaje cuaternario.***

El reciclaje cuaternario es el método por el cual se aprovecha la energía interna útil de los desechos plásticos mediante procesos térmicos de descomposición, es decir que se utiliza como combustible en distintos procesos, sus ventajas son evidentes pues produce grandes cantidades de energía y reduce su cantidad de desechos, aunque tras su inflamación genera grandes cantidades de contaminantes (SPI, 1999).

#### **2.2.10.    *Técnicas de recuperación de plásticos.***

Las técnicas o tecnologías de recuperación de plásticos es un campo muy investigado en la actualidad pues su gran demanda y producción causa saturación de residuos, existen varios métodos tanto mecánicos como químicos.

##### **2.2.10.1.    *Recolección y selección.***

La recolección de residuos plásticos es un proceso netamente mecánico pues se basa en la recopilación y acumulación de los residuos plásticos en lugares específicos denominados plantas de reciclaje, rellenos sanitarios, entre otros. Es un proceso que involucra grandes cantidades de recursos y mano de obra puesto que cada día se generan residuos plásticos.

La selección de los residuos plásticos es un proceso muy complejo en que se procura recuperar la mayor cantidad de plásticos de un mismo tipo, pues su demanda se localiza en función a su grado de pureza. Para llevar a cabo dicha operación se requiere del uso de equipos y mano de obra que selecciona los residuos dependiendo su material y composición.

La macroselección es el método más sencillo en cuanto se refiere a clasificar los residuos pues se basa en su composición, generando grandes lotes de un mismo tipo de plástico que posteriormente se los separa por forma y tamaño mediante equipos que los separan de otros materiales como madera, metales, vidrio. Los equipos más utilizados pueden ser sistemas de chorros de aire, electromagnetos, sistemas de inducción eléctrica de separación de aluminio, cribado de residuos, etc., (Larrauri; et. al, 1997).

La microselección es un método que consiste en separar los plásticos por su tipo mediante procesos de flotación gracias a la diferencia de densidad que tiene cada tipo de plástico. Para este método se ha utilizado varias soluciones de agua - alcohol, soluciones salinas de varias concentraciones que facilita la separación del poliestireno y la microselección criogénica para identificar el polipropileno por su forma característica de ruptura a bajas temperaturas (Larrauri; et. al, 1997).

Otro método de selección es conocido como selección molecular el cual utiliza solventes para disolver cierto tipo de plásticos y separarlos así de otro con diferentes composiciones, este método es muy utilizado en procesos en los que se procura obtener altos nivel de pureza (González, 2005).

#### *2.2.10.2. Técnica de reciclaje mecánico*

El reciclado mecánico es una técnica netamente física de recuperación de plásticos, consiste inicialmente en la separación manual de plásticos del resto de residuos sólidos urbanos. Una vez seleccionado y agrupado según su tipo se procede a separar material no deseado, retirar sus impurezas para posterior reducir su tamaño a proporciones manejables mediante trituración que luego serán fundidos o moldeados según las necesidades (Hernández, 2007).

Esta técnica tiene gran resultado en plásticos termoestables por su propiedad de moldearse al calor, mas no para el resto de plásticos puesto que se limita su rendimiento.

#### *2.2.10.3. Técnica de reciclaje químico*

A diferencia del reciclaje mecánico que solo separa con éxito a los plásticos termoestables, el reciclado químico aprovecha las propiedades químicas de sus componentes para devolverlos a su estado molecular original, dicha técnica fuerza a las moléculas a volver a su estado virgen con lo cual eleva el grado de pureza y especificidad haciéndolo muy cotizado para la industria. El reciclaje químico se fundamenta en la naturaleza del componente plástico y su proceso de polimerización al momento de su fabricación, por lo tanto:

- Para polímeros de condensación la técnica más habitual es la despolimerización cuyos resultados son sus monómeros básicos originales los cuales se pueden reintroducir al proceso de elaboración de plásticos puesto que tienen las mismas propiedades químicas iniciales. Aquí se encuentra los plásticos del tipo polietilentereftalato (PET), mediante procesos químicos de

hidrólisis, metanólisis o glicólisis, operaciones cuyas temperaturas varían de entre 25 – 30 °C y presión de 1 – 40 Bar (Milgrom, 1992).

- Para aquellos plásticos de síntesis polimérica aditiva es difícil obtener sus monómeros originales mediante despolimerización, por lo que se utiliza procesos térmicos para obtener sus componentes elementales como hidrocarburos ligeros, gas de síntesis, coque, etc. En este proceso se encuentra el polipropileno, poliestireno, polietileno de baja y alta densidad, entre otros. La temperatura de operación varía dependiendo del tipo de proceso como se muestra en la tabla 5-2 (Serrano, 2001).

**Tabla 5-2.** Reciclado químico de plásticos

PROCESO	CONDICIONES
<b>Hidro craqueo</b>	Temperatura :400 – 500 °C Presión: 100 bar
<b>Gasificación</b>	Temperatura :1200 – 1500 °C Presión: En función a sus condiciones
<b>Craqueo Térmico</b>	Temperatura :500 – 800 °C Presión: En función a sus condiciones
<b>Craqueo Catalítico</b>	Temperatura :400 – 500 °C Presión: En función a sus condiciones

**Fuente:** (Serrano, 2001). Reciclado químico de plásticos

**Realizado:** Oscar Pinajota, 2018

### 2.2.11. *Hidro craqueo*

Es un proceso químico que consiste en la adición de un grupo hidrogeno a una molécula insaturada de un hidrocarburo, rompiendo los dobles, triples enlaces y hasta enlaces Carbono-Carbono en presencia de un catalizador, cuya presión ronda los 100 bar y una temperatura entre 400 – 500 °C (Bittner, 1999).

Este proceso es muy eficiente debido a que puede tratar mezclas de plásticos aun sin someterlos a tratamientos de limpieza, puede ser destructiva y no destructiva.

- Destructiva: rompe los enlaces covalentes para dar formación a moléculas de menor tamaño añadiendo un hidrogeno en los puntos de ruptura del enlace.
- No destructiva: rompe los dobles y triples enlaces y añade un hidrogeno a una molécula insaturada para saturarla.

La mayoría de procesos de hidrogenación se realiza con el uso de catalizadores metálicos como: Platino (Pt), Paladio (Pd), Níquel (Ni), Cobalto (Co) o Amonio (NH<sub>3</sub>). La existencia de ciertos compuestos como cloro (Cl), azufre (S) y metales pesados no son producen riesgo al proceso. La hidrogenación al ser un proceso muy costoso que opera a elevadas presiones, se lo considera como de alto riesgo debido a que la mezcla hidrogeno-aire es una mezcla explosiva y de baja rentabilidad por su alto mantenimiento (Bittner, 1999).

### **2.2.12. Gasificación**

Consiste en la descomposición térmica de residuos plásticos con una cantidad de oxígeno insuficiente, generando una combustión incompleta, obteniéndose un gas de síntesis (que contiene CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, entre otros), para la síntesis de metanol, que puede emplearse tanto para producción de electricidad, con fines térmicos o para producir biocombustibles líquidos y químicos. Consecuentemente, este gas debe ser tratado para eliminar compuestos que puedan dañar el equipo utilizado. El subproducto sólido resultante (tipo de alquitrán), puede servir para otros fines como construcción de carreteras (Steinvorth, 2014).

La gasificación consta de dos fases las cuales son:

- Producción de lubricantes (aceites) de alta viscosidad resultado de la licuefacción de los residuos plásticos. Tratados en lechos de arena.
- El lubricante es gasificado con vapor de agua y oxígeno a temperaturas que varían de 1200 y 1500 °C

El aprovechamiento energético de estos gases puede realizarse en una cámara de combustión, o introduciéndolo en una turbina de gas o un motor de combustión interna, el agente gasificante puede ser aire, pero normalmente se utiliza oxígeno por su obtención gratis del ambiente, vapor de agua o hidrógeno, de modo que se obtienen diferentes mezclas de gases que a su vez pueden tener diferentes utilidades (González, 2005).



Según Texaco que aprovecha este proceso, el rendimiento de gasificación varía dependiendo de la tecnología, el combustible y el agente gasificante que se utilice, en el rango de 70-80% (Serrano, 2001).

#### **2.2.13. *Cracking o Pirólisis de los plásticos***

La pirólisis o cracking es un proceso de ruptura molecular del plástico por aumento de temperatura y acción catalítica de compuestos específicos que generan gases, líquidos y sólidos ricos en monómeros básicos como propeno, estireno, etileno, aromáticos, etc., en función del tipo de plástico a procesar en temperaturas comprendidas entre 400 – 1500 °C (Mancheno, 2015).

La proporción de los productos obtenidos depende de la variación de temperatura, velocidad y tiempo de calefacción, tiempo de residencia, materia prima, dimensión de la materia prima, tipo de catalizador, superficie de contacto (polímero – catalizador), tipo de reactor, etc. La pirólisis es la reconversión de residuos plásticos ricos en materias petroquímicas y combustibles, a través de procesos terciarios o de reciclaje siendo una tecnología muy comprometedora, en muchos casos con grandes reveses y dificultades económicas de implementación de nivel de laboratorio hasta la escala industrial (Mancheno, 2015).

Las ventajas de esta técnica radican en la capacidad de recuperación de plásticos y la disminución de emisiones gaseosa hasta en 10 veces por otros métodos, la desventaja más notable es la cantidad de energía y recursos necesarios para mantener en producción dicho proceso (Billy, 2011)

Según el proceso de reacción la pirólisis se divide en dos:

- Pirólisis térmica
- Pirólisis catalítica

#### **2.2.14. *Craqueo catalítico de los residuos plásticos***

O también llamado pirólisis catalítica es un tipo de reciclaje químico en donde se utiliza como principal fuente de descomposición de polímeros a un catalizador generalmente sólidos con características ácidas como las arcillas llamadas comúnmente zeolitas, esta reacción se origina en los centros activos de los catalizadores, el cual ayuda al intercambio iónico favoreciendo la ruptura del enlace Carbono-Carbono (Hernández, 2007).

A diferencia de la pirólisis térmica, la utilización de un catalizador de tipo arcilloso (con alto contenido de sílice  $\text{SiO}_2$  y alúmina  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) favorece a la velocidad de reacción a bajas temperaturas en el proceso de degradación de polímeros, lo que representa un rubro importante en la industria (Serrano, 2001).

Los catalizadores al actuar de forma selectiva mejoran los rendimientos de fracciones gaseosas y líquidas de elevada demanda por su valor (naftas y aromáticos) disminuyendo la producción de coque (residuo no deseado de la pirolisis de plásticos). Los catalizadores adecuados pueden tener la capacidad de controlar tanto el rendimiento del producto y la distribución de productos de degradación del polímero, así como para reducir significativamente la temperatura de reacción, que puede conducir a un proceso más barato con productos más valiosos (Y.-H. Lin, M.-H. Yang, 2006).

Las reacciones de pirolisis catalíticas se realizan en los centros activos de los catalizadores (Mordi, y otros, 1991), cuya velocidad de reacción depende de la naturaleza del polímero y de la naturaleza del catalizador. El problema del uso de catalizadores es la contaminación por inhibidores o venenos catalíticos que reducen la acción catalítica generando productos indeseados o reacciones incompletas con altos índices de impurezas (Serrano, 2001).

#### **2.2.15. Craqueo térmico de los residuos plásticos**

También conocido como pirólisis térmico es una operación de tipo endotérmica es decir que requiere de calor para producir su reacción cuyas temperaturas rodean los 350 – 650 °C en función del plástico a descomponer, aunque para alcanzar mejores rendimientos y pureza ciertos procesos requieren de valores entre los 900 – 1000 °C (Mesa y Ortiz, 2016).

Es considerado como un proceso térmico en el cual la temperatura actúa como único agente de activación causando la ruptura molecular de los polímeros con generación de cadenas moleculares cortas en comparación a las originales con un punto de ebullición menor. Da como resultados una mezcla de compuestos gaseosos, líquidos y sólidos (Serrano, 2001).

El producto sólido en su mayoría es un compuesto de carbono que carece de hidrogeno en su estructura el cual se libera tras el proceso de la pirólisis por lo tanto es considerado como el residuo

con mayor degradación aunque se suele recuperar parte del residuo plástico relativamente intacto puesto que debido a ciertos factores como las bajas temperaturas no han reaccionado y se mantienen con su estructura original (Hernández, 2007).

Los productos gaseosos generalmente los constituyen los monómeros base de los plásticos degradados en forma de hidrocarburos de cadena corta muy volátiles y apreciados en la industria por su elevada capacidad calorífica que rodea los 400 KJ/Kg, es por tal motivo que suelen ser usados en el proceso de pirólisis como combustible. Además, se utilizan como materia prima para procesos de polimerización como por ejemplo la producción de propileno resulta en la síntesis de polipropileno, acetona y poliuretanos (Hernández, 2007).

Los productos líquidos son compuestos de cadena molecular larga que se condensan por su tamaño y sirven como materia prima para pirólisis secundarias como la nafta constituida principalmente por compuestos aromáticos y parafinas lineales y cíclicas cuya descomposición es el propileno y etileno principalmente.

Además, son considerados componentes de las gasolinas por tal motivo presentan un alto poder calorífico, la desventaja del proceso radica en la gran variedad de compuestos generados por lo que es imprescindible la refinación (Hernández, 2007).

#### **2.2.16. Factores que influyen en el proceso de pirólisis térmica**

Hay muchos autores que han realizado estudios de los parámetros que afectan en los productos finales de la pirolisis térmica de los residuos plásticos que son biocombustibles sólidos, líquidos o gaseosos, los factores principales son:

- Temperatura
- Velocidad de calefacción
- Presión
- Humedad
- Tipo de reactor utilizado
- Tiempo de residencia
- Material de alimentación
- Tamaño de partícula

#### *2.2.16.1. Efecto de la temperatura en la pirólisis térmica*

La temperatura es una de las variables más importantes pues es aquella que va a permitir generar productos de mayor pureza por lo que a una mayor temperatura se verán favorecidos los productos volátiles con baja generación de residuos sólidos. La temperatura es la responsable de la velocidad de descomposición térmica del plástico y su estabilidad al momento de entrada y salida de productos, favoreciendo la ciclación de compuestos aromáticos (Cozzani V et. al, 1997).

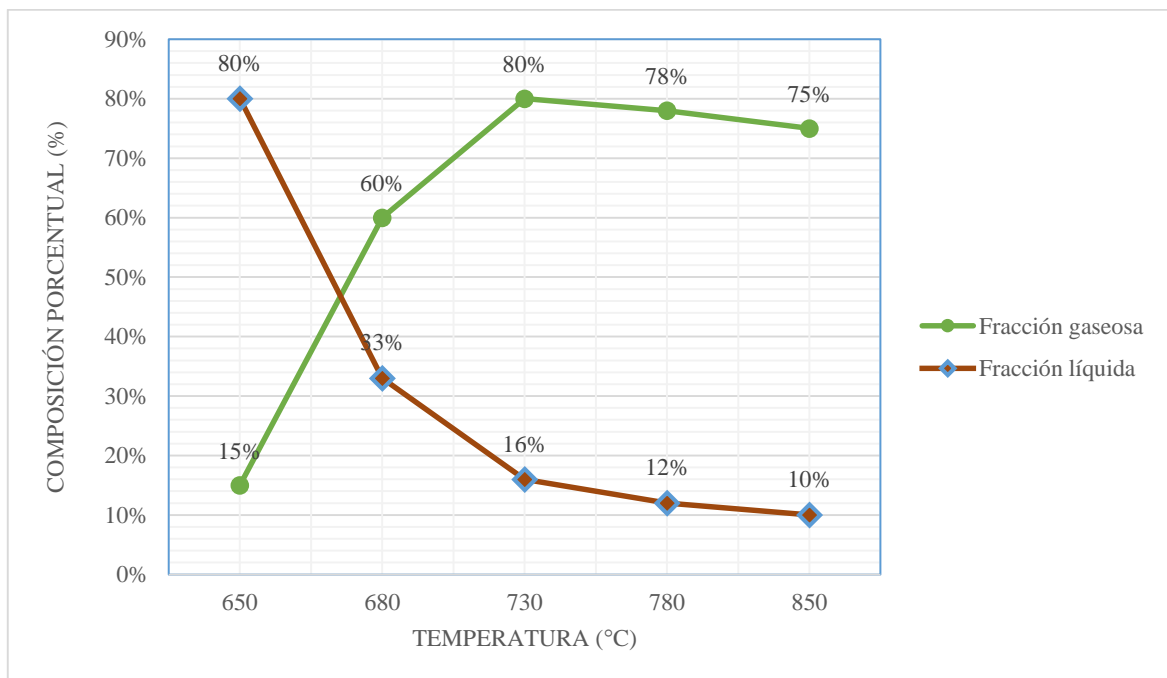
En el proceso de pirolisis térmica se necesita grandes cantidades de energía en forma de calor para romper los enlaces covalentes, esto se debe a que el calor genera vibraciones moleculares en los enlaces rompiendo las fuerzas de Vander Walls que unen a los átomos de carbono.

La temperatura afecta directamente sobre la estructura y comportamiento interno del plástico, el polipropileno y el polipropileno al tratarse de plásticos termoestables, su comportamiento frente a altas temperatura se ve afectado en el debilitamiento del enlace Van der Waals convirtiéndolo de un cuerpo sólido a un fluido viscoso favoreciendo el moldeado una vez enfriado (UPV, 2017).

Según el rango de temperatura de la operación se puede distinguir predominio de ciertas fracciones resultado del proceso:

- Entre 330°C y 450°C se ve favorecido a la generación de fracciones viscosas líquidas, con alta generación de coque y subproductos indeseados.
- A temperaturas mayores a 500°C se favorece la generación de fracciones gaseosas simples.
- A partir de 700 °C la fracción sólida tiene estrecha relación con el rendimiento de la fracción gaseosa. Es decir que se produce una mayor descomposición con crecimiento molecular de las cadenas (Cozzani V et. al, 1997).

En el caso de mezcla de plásticos la reacción produce altos niveles de fracciones líquidas pesadas sin embargo cuanto mayor sea la temperatura la relación de generación de fracciones líquidas será inversamente proporcional a la producción de gases tal como se indica en la siguiente gráfica.



**Gráfico 2-2.** Producción de fracciones líquidas y gaseosas a temperaturas mayores de 700°C

**Fuente:** (Mesa y Ortiz, 2016). Evaluación del proceso de pirólisis para la producción de diésel a nivel laboratorio a partir de residuos plásticos de industrias de alimentos.

#### 2.2.16.2. Efecto sobre la velocidad de Calefacción

La velocidad de calefacción determina el tipo de proceso que le llevara a cabo en la pirólisis de plásticos por ello de sede controlar la temperatura de operación puesto que tienen una estrecha relación. Las temperaturas en las que se dan estos procesos van desde 500°C hasta superiores a los 1000°C, la cual podemos clasificar en:

- La carbonización es un proceso de destrucción térmica en el que se pierde compuestos como oxígeno, hidrogeno, nitrógeno, azufre, entre otros predominando átomos de carbono. A temperaturas de 950 °C se tiene un contenido de carbono en el residuo de aproximadamente 90% en peso, mientras que a temperaturas mayores de 1350°C se tiene 99% de carbono en el peso total del residuo (Serrano, 2001).
- En una pirólisis lenta la velocidad de calentamiento se mide en °K/min e incluso en °K/h, tardándose en el peor escenario varios días dependiendo de la reacción requerida, siendo los

productos con mayor cantidad las fracciones sólidas, mientras que las fracciones líquidas y gases se dan en menor cantidad.

- En este proceso se distinguen dos métodos: La Carbonización vegetal que puede durar incluso días a una temperatura de 400 °C dando como producto principal carbón y la pirólisis convencional que se realiza a 600°C, se obtiene productos como carbón, bioaceites y gases.
- La pirólisis rápida se caracteriza por generar en mayor proporción fracciones de hidrocarburos líquidos por altas velocidades de calefacción, tiempo de residencia corto a temperaturas bajas. Esto se debe a que la materia prima requiere temperaturas bajas para alcanzar el punto de ebullición.
- En la pirólisis flash la velocidad de calentamiento es demasiado alta, valorada en °K/seg, maximizando la generación de fracciones gaseosas.

#### *2.2.16.3. Efecto de la presión sobre la pirólisis térmica.*

La presión es la una variable que se genera en función de la temperatura por lo tanto a mayor temperatura mayor será su presión interna, cabe destacar que una elevada presión favorece la generación de fracciones gaseosas no condensables (compuestos sulfurados, dióxido de azufre, sulfuro de hidrógeno, compuestos azufre total reducido, mercaptanos, dimetilsulfuro, dimetildisulfuro) por lo que se tendrá menor proporción de fracciones líquidas (Arce y Suarez, 2017).

#### *2.2.16.4. Efecto de la humedad sobre la pirólisis térmica*

La presencia de agua en la muestra plástica representa un gran inconveniente pues el calor suministrado al proceso se enfocará en transformar prioritariamente el agua en vapor, resultado de la evaporación el proceso se descontrola anticipando la reacción de forma violenta a temperaturas menos a las originales (Arce y Suarez, 2017).

### 2.2.16.5. Efecto del tiempo de residencia

Se conoce como tiempo de residencia al momento en el cual se produce la primera reacción pirolítica por efecto de la temperatura. Junto con la velocidad de calentamiento y el tiempo de residencia genera una variedad de productos como se indica en la siguiente tabla (Aracil I., 2008).

**Tabla 6-2.** Tiempo de residencia y sus productos

PROCESO	Velocidad de Calefacción	Tiempo de residencia	Temperatura (°C)	Producto Generado
<b>Carbonización</b>	Baja	Mayor a 25 horas	450 – 600	Carbón
<b>Pirólisis lenta</b>	10 – 100 °K/min	10 – 60 min	450 – 600	Fracciones líquidas y gaseosas
<b>Pirólisis Rápida</b>	Mayor a 1000 °K/s	0.5 – 5 s	550 – 650	Fracciones líquidas en su mayoría
<b>Pirólisis Flash</b>	Mayor a 10000 °K/s	Menor 1s	450 - 900	Fracciones gaseosas en su mayoría

**Fuente:** (Nayely, 2010). Parámetros del tiempo de residencia en la pirólisis

**Realizado:** Oscar Pinajota, 2018

Según Ludlow-Palafox et al.,(2001), mientras mayor sea el tiempo de residencia de los polímeros en el reactor mayor será la fracción gaseosa, disminuyendo las fracciones líquidas y sólidas, además el tiempo de retención puede generar reacciones secundarias y terciarias afectando los productos finales.

### 2.2.16.6. Efecto del tamaño de la partícula plástica en la pirólisis térmica

El tamaño de la partícula es una variable importante en la pirolisis de residuos plásticos debido a que mientras menor sea el tamaño del polímero su degradación será más rápida y necesitara menor energía, esto sucede ya que el área de transferencia es menor aumentando el rendimiento final.

Karaduman A. et al., (2001), demostró en su investigación que mientras menor es el tamaño de la partícula que se piroliza menor es la generación de fracción sólida obtenida y mayores fueron los rendimientos de las fracciones líquidas y gaseosas.

#### *2.2.16.7. Efecto de la materia prima utilizada en la pirólisis térmica*

La materia prima utilizada también es una variable que afecta al rendimiento de productos como fracciones líquidas, gaseosas o sólidas, ya que ciertos polímeros dan mayores rendimientos líquidos (poliestireno), otros gaseosos (polipropileno) y otros incluso hasta compuestos peligrosos (PVC policloruro de vinilo) (Aracil I., 2008).

#### *2.2.16.8. Efecto del tipo de reactor en la pirólisis térmica*

Un reactor químico es un dispositivo en cuyo seno se realiza una reacción química, en este caso se produce una degradación térmica para efectos pirolíticos, concebida para la generación de altos rendimientos maximizando la transformación y reduciendo el coste de producción al mínimo. Un reactor para pirólisis térmica de polipropileno y poliestireno necesita análisis termodinámicos, cinética de reacción, balances de masa y energía, condiciones de operación, etc. (Scheirs J y Kaminski W, 2006).

Los reactores químicos se suelen clasificar de varias formas entre las que tenemos:

- Según su operación los reactores se clasifican en discontinuos (batch) los cuales al finalizar la reacción química requieren de una nueva carga de materia por lo que su proceso se reinicia y así sucesivamente. Los reactores continuos por otro lado actúan de forma continua sin reiniciar su proceso por lo que constantemente se genera producto sin la necesidad de parar la operación.
- Según su flujo interno se clasifican en ideales y no ideales, los primeros son aquellos que se puede establecer con simples ecuaciones de reacción sin considerar ciertos efectos. Por su parte los no ideales considera los aspectos más complejos del proceso tales como dinámica del material, zonas en las cuales no circula la materia a descomponer, etc., por lo que se debe tener en cuenta la cinética de reacción.



- Según la fase molecular suelen dividirse en homogéneos, aquellos que operan en una sola fase ya sea líquida, sólida o gaseosa y los procesos heterogéneos los cuales pueden presentar varios estados a la vez.

El tipo de reactor es el factor que presenta mayor impacto en el proceso de pirólisis de poliestireno y polipropileno debido a que los factores antes mencionados se validan dentro de un reactor, su rendimiento es el que determina la eficiencia y eficacia de la operación. Los equipos mayormente utilizados para el proceso de pirólisis de polipropileno y poliestireno según la recopilación bibliográfica son los siguientes:

#### *2.2.16.8.1. Reactor de tornillo*

El reactor de tornillo contiene en su estructura un tornillo *sin fin* el cual se encarga de transportar el plástico a través de sus caramas de calefacción mediante un movimiento giratorio continuo. La pirólisis ocurre al momento que el residuo plástico atraviesa las zonas calientes viéndose afectado particularmente por el tiempo de residencia del material y la temperatura de calefacción, se puede mejorar su rendimiento variando la velocidad de giro del tornillo. Funciona con una mezcla de residuo plástico y aceite resultado de misma la pirólisis (Aguado et. al, 2003).

#### *2.2.16.8.2. Reactor de extrucción*

El reactor extrusor tiene un funcionamiento similar al reactor de tornillo pues en su estructura contiene un tornillo *sin fin* que traslada la materia prima a través de una cámara caliente, una vez alcanzada la temperatura de fusión el material se introduce a un reactor extrusor donde se realiza una descomposición térmica primaria. Es posible agregar un segundo reactor térmico o catalítico para realizar una segunda descomposición utilizado para la pirólisis de poliestireno, polipropileno, polietileno de alta y baja densidad y polietilentereftalato (Ciocălțu, 2001).

#### *2.2.16.8.3. Reactor de tanque agitado*

El reactor de tanque agitado facilita el manejo de fluidos viscosos con gran generación de fracciones líquidas y gaseosas, tiene en su estructura un sistema de agitación que homogeniza la

materia prima para descomponer de manera uniforme todo el material contenido en el reactor aumentando su rendimiento (Hernández, 2007).

Un reactor de tanque agitado desde el punto de vista ideal mantiene igual las concentraciones y velocidades de reacción tanto en el interior del reactor como en los fluidos de salida, en la realidad ocurre variaciones muy considerables que deben tomar en cuenta en la cinética química, aunque la existencia de una eficiente homogenización lleva el proceso a la idealización (Walas, 1998).

#### *2.2.16.8.4. Reactor de lecho fijo*

Un reactor de lecho fijo resulta muy difícil el control de su temperatura especialmente en aquellos de gran dimensión debido a la poca conductividad térmica de los plásticos provocando zonas de distinta temperatura que afectan a la pirólisis (Font y Conesa, 2002).

Existe una clara diferencia entre el uso de catalizadores y la temperatura como fuente de activación debido a que sin el uso de catalizadores la reacción se vera afectada directamente de la concentración del plástico y el tiempo de calefacción. Este tipo de reactor ha sido muy utilizado en la descomposición de polipropileno, poliestireno, polietileno con sus derivados, aceites, etc., (Hernández, 2007).

#### *2.2.16.8.5. Reactor de lecho fluidizado.*

Es uno de los reactores más ocupados a nivel industrial por su facultad de transferir calor a toda la superficie del plástico a lo largo de todo el reactor aumentando el rendimiento de productos. Este tipo de reactor puede utilizar la temperatura como único medio de activación química o variedad de catalizadores. Se ha utilizado para la descomposición de poliestireno, polipropileno, polimetilmetacrilato, mezcla de polímeros plásticos, cauchos, gomas, lubricantes sintéticos y minerales (Hernández, 2007).

El reactor de lecho fluidizado presenta una gran versatilidad puesto que puede operar a distintas condiciones ya sea de forma continua o discontinua, al uso o no de catalizadores, la modificación de las variables de operación facilita su uso a lo largo de todos los procesos en los cuales se involucra transformaciones químicas, es por ello que su uso en el sector industrial es muy elevado (Mancheno, 2015).

Existe mucha variación de este reactor con el objetivo de mejorar su rendimiento tales como:

- La recirculación del fluido durante la reacción facilita la degradación del material por tanto se ha diseñado el reactor de lecho fluidizado con recirculación que genera movimiento cíclico gracias a conductos externos presentes en el reactor los cuales expulsan el residuo sólido y gases por la parte superior los cuales son separados y condensados para obtener fracciones líquidas.
- El reactor *spout bed* es una variación similar a la anterior mencionada con la diferencia que el residuo sólido se mantiene en el interior de la cámara recirculando durante el proceso para obtener la mayor cantidad de gases y posteriormente condensarlo.
- Existe un tipo de reactor conocido como lecho fluidizado con recirculación interna cuyo funcionamiento es prácticamente igual al de lecho fluidizado con recirculación la única diferencia radica en que la recirculación del producto ocurre por medio de conductos instalados en el interior del reactor.

#### 2.2.16.8.6. Autoclave

La autoclave es un tipo de reactor que se fundamenta en la descomposición térmica bajo ciertas condiciones específicas de presión las cuales deben ser estrictamente constantes para la producción de compuestos deseados (Steininger y Walendziewski, 2001).

#### 2.2.16.8.7. Reactor de esferas

El reactor de esferas es un equipo constituido por un lecho en cuyo interior contiene esferas metálicas las cuales sufren movimientos ascendentes por parte de un tornillo *sin fin* provocando una controlada distribución térmica, favoreciendo al proceso pirolítico y por ende la reducción de abastecimiento energético (Bockhorn, et. al, 1999).

#### *2.2.16.8.8. Reactor riser*

El reactor riser es un equipo al vacío que basa su funcionamiento a la circulación interna del residuo plástico, dicho vacío generado por las turbinas en su parte superior provoca que el plástico ascienda y descienda constantemente formando corrientes circulatorias, produciendo la transferencia térmica a lo largo de toda la superficie del residuo. Este tipo de reactor puede utilizar catalizadores o simplemente la energía producida por un sistema de calefacción y el mismo proceso de vacío. Utilizado muy a menudo en la pirólisis de mezclas poliméricas e hidrocarburiíferas (Arandes, et. al, 1999).

#### *2.2.16.8.9. Reactor cónico rotatorio*

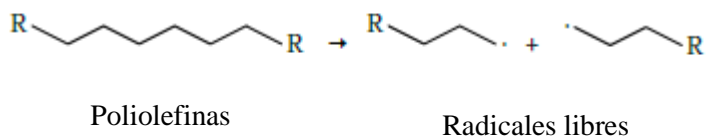
Este tipo de reactor contiene un lecho de arena y se fundamenta en el movimiento giratorio de las partículas a lo largo del cono, dicho movimiento provoca que las mismas asciendan a la parte superior del reactor y desciendan a través de conductos a la parte inferior del cono donde se encuentran originalmente, allí se realiza la transferencia térmica y el proceso inicia nuevamente en un ciclo continuo hasta que se genera la máxima la producción gaseosa. La eficiencia de este reactor se ve determinada con la reutilización del residuo sólido generado, el cual sirve de fuente energética proporcionando calor y con ello la disminución de costos de operación (Bilesheuevel et al., 2000).

### *2.2.17. Mecanismo de degradación pirolítica térmica*

El mecanismo de pirólisis para las poliolefinas en cuyo grupo se encuentra el polipropileno y poliestireno se da lugar por la formación de radicales libres e incluyen varias etapas las cuales se describen a continuación (Kaminsky y Schmidt, 2001).

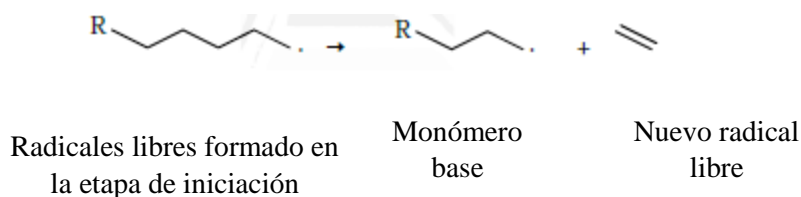
#### *2.2.17.1. Etapa de Iniciación*

La etapa de iniciación ocurre cuando se produce la ruptura de la poliolefina formando radicales libres primarios los cuales pueden ser de cadena carbonada alargada. La ruptura del enlace carbono – carbono ocurre por lo general en donde se encuentran alojadas impurezas es decir menor energía de enlazamiento, desde este punto inicia la pirólisis con la generación de una gran variedad de productos en función de las condiciones existentes (Williams E y Williams P, 1999).



#### 2.2.17.2. Etapa de Propagación

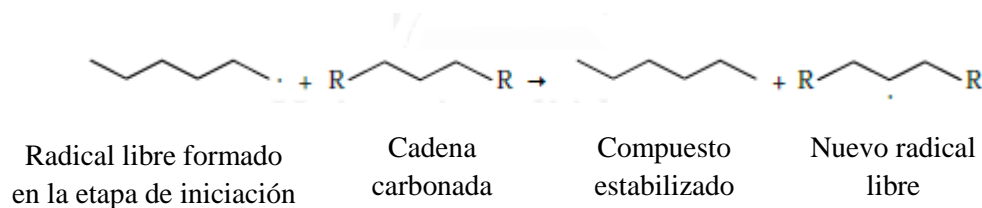
Es en esta etapa en la que se decide los productos generados por lo que se debe tener en cuenta las condiciones de operación, aquí se puede producir una ruptura en el enlace  $\beta$  del radical formado en la etapa anterior. Dicho radical puede ser hidrogenado para su estabilización tanto de forma intramolecular como intermolecular.



Para la estabilización del radical formado se puede seguir dos opciones distintas que comprenden:

#### 2.2.17.2.1. Opción 1

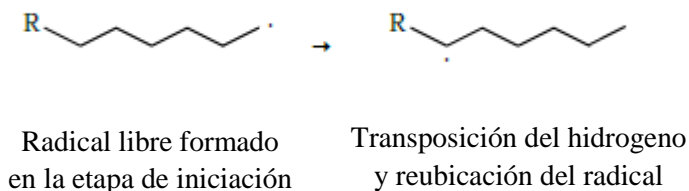
Consiste en la extracción de una molécula e hidrogeno de la cadena carbonada más cercana, este efecto se facilita en reacciones en las que existe una gran cantidad de compuestos hidrogenados.



#### 2.2.17.2.2. Opción 2

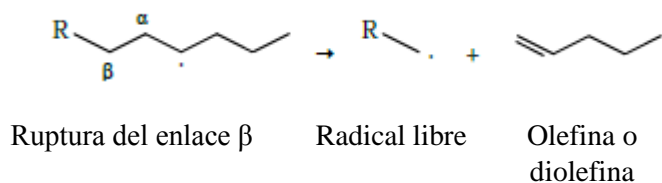
La segunda ruta de estabilización consta de dos procesos cuyo producto es un compuesto insaturado.

- Se produce la transposición intramolecular de una molécula de hidrógeno al carbono insaturado, cambiando la posición del radical.

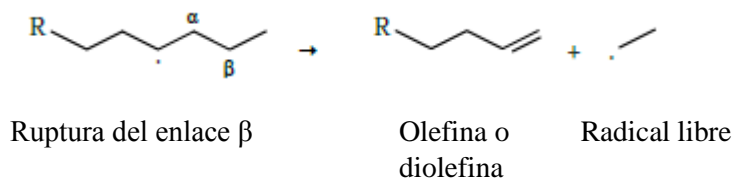


- Ruptura en la posición  $\beta$  del carbono adyacente al radical con formación de olefinas y nuevos radicales.

La primera ruptura con generación de una olefina y un radical de la cadena carbonada original.



La segunda ruptura con generación de una olefina de la cadena carbonada original y un radical de cadena corta.



La generación de monómero base en la pirólisis a través de este mecanismo está influenciada por los factores mencionados en la sección 2.2.17. se debe considerar ciertos aspectos tales como:

- La ruptura del enlace  $\beta$  esta favorecida a temperaturas altas con generación de monómeros de cadena corta que reaccionan entre sí para formar compuestos parafínicos o aromáticos mejorando el rendimiento de los productos (Bockhorn et al., 1999).

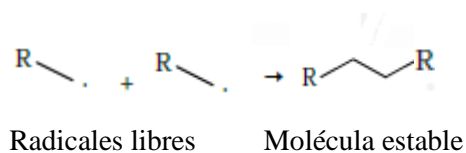
- En dependencia de la materia prima a degradar y a la abundancia de moléculas de hidrógeno favorece la ruptura del enlace  $\beta$  por la *opción dos* generando mayor rendimiento de monómeros base (propileno y estireno), de esto depende la producción de compuestos saturados o insaturados.

### 2.2.17.3. Etapa de Terminación

Es esta etapa se produce el enlazamiento de los radicales libres formando compuestos estables, puede ocurrir por medio de dos reacciones.

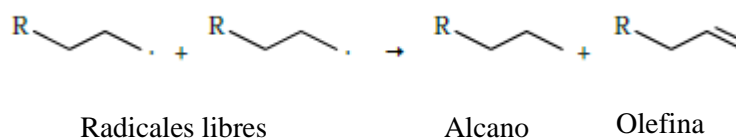
#### 2.2.17.3.1. Recombinación

Los radicales generados en la etapa de propagación de enlazan en pares formando una nueva molécula.



#### 2.2.17.3.2. Desproporcionamiento

Los radicales de cadena larga se combinan formando moléculas de alcanos y olefinas estables.

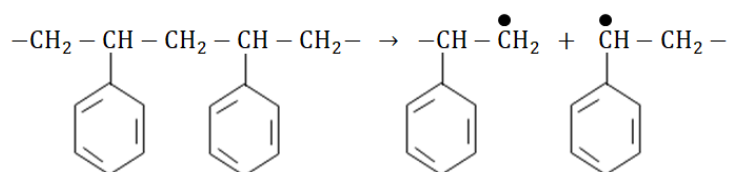


El mecanismo de descomposición térmica se basa en la generación de radicales libres por lo que la materia prima y la temperatura del reactor determinan el tipo de productos obtenido.

## 2.2.18. Reacción de descomposición para el poliestireno

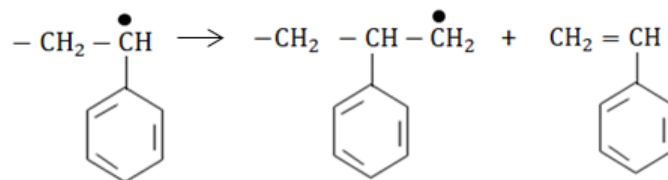
### 2.2.18.1. Iniciación

Las moléculas reaccionan por adición de la temperatura causando una ruptura C – C, dando como producto radicales libres.

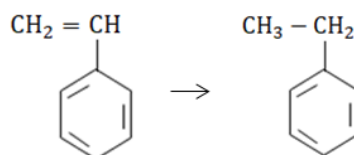


### 2.2.18.2. Propagación

Ruptura de cadena en posición  $\beta$  obteniendo como producto un monómero y un nuevo radical.



Hidrogenación del metilestireno con formación de estireno



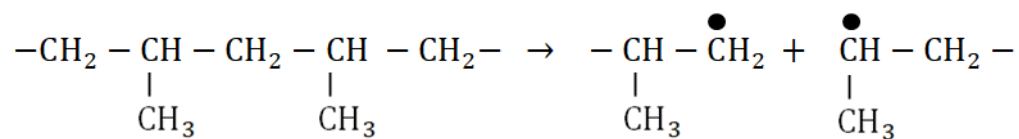
Transferencia molecular interna de hidrógeno de un carbono adyacente con una ruptura en posición  $\beta$  de C – C de aquellos radicales sometidos a transferencia de hidrógeno.



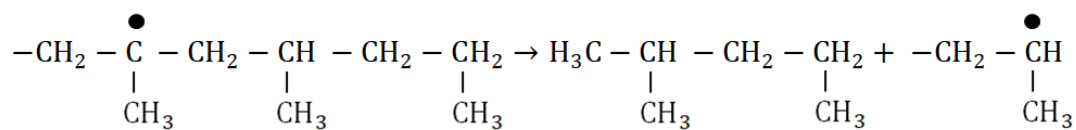
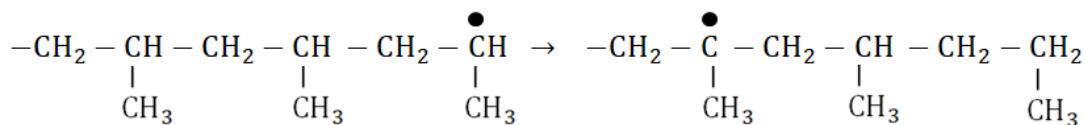
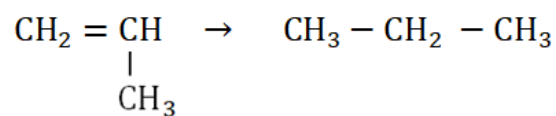
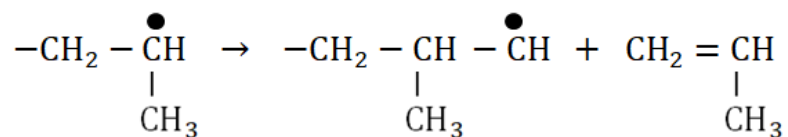


## 2.2.19. Reacción de descomposición para el polipropileno

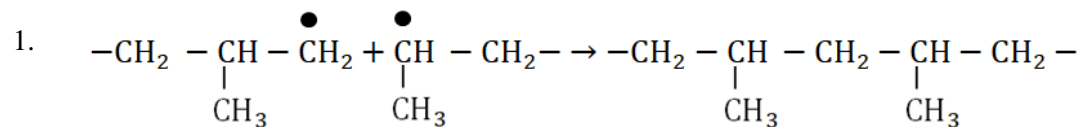
### 2.2.19.1. Iniciación



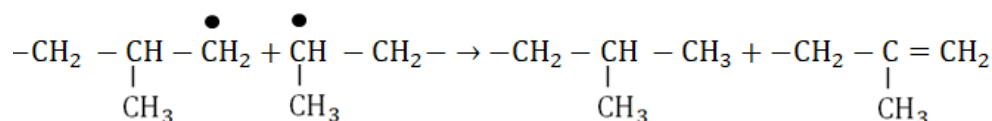
### 2.2.19.2. Propagación



### 2.2.19.3. Terminación



2.



### 2.2.20. *Energía necesaria para la ruptura de los enlaces en el poliestireno y polipropileno*

Una de las principales causas de alteración de los polímeros es su propia composición química. Dentro de ésta hay que destacar la existencia de determinados grupos químicos, que pueden estar presentes en la cadena principal o bien en las ramificaciones, según se trate de un polímero de estructura lineal o ramificada. Como es sabido, cualquier reacción química o energía necesaria (temperatura °C) que afecte a un compuesto orgánico implica una ruptura de enlaces covalentes, por tanto, el valor de las energías de enlace puede informar sobre la estabilidad de una cierta unión o grupo químico. Sin embargo, en el caso de los polímeros, éste no es el único factor determinante y, en consecuencia, los grupos químicos o enlaces implicados en estas reacciones pueden mostrar una reactividad química diferente que en las moléculas sencillas. Una de las razones es que en los polímeros, estos grupos se encuentran unidos de manera repetitiva a lo largo de la cadena, ya que forman parte de su unidad estructural y, por tanto, están muy próximos entre sí. Esta disposición puede favorecer la reacción entre los mismos (reacciones intramoleculares) dando lugar a estructuras cíclicas. (McNeill, 1992.)

**Tabla 7-2.** Energía de enlace de algunos grupos presentes en polímeros sintéticos

Enlace	Energía (kJ/mol)	Enlace	Energía (kJ/mol)	Enlace	Energía (kJ/mol)
<b>C – F</b>	485	<b>O – H</b>	464	<b>C = O</b>	732
<b>C – H</b>	416	<b>O – H</b>	391	<b>C = C</b>	612
<b>C – O</b>	361				
<b>C – C</b>	349				
<b>C – Cl</b>	340				
<b>C – N</b>	307				

**Fuente:** Margarita San Andrés, Ruth Chércoles, José Manuel de la Roja, Marisa Gómez, 2010

Por ende, la energía necesaria que se requiere para que se produzca la ruptura de enlaces C – C para el Poliestireno y el polipropileno es de 349 kJ/mol, mientras que para los enlaces C = C es de 612 kJ/mol

### **2.2.21. *Productos generados de la pirólisis térmica***

Los compuestos poliolefinicos como el poliestireno, polipropileno y polietileno principalmente tras un proceso de degradación térmica generan parafinas, olefinas y aditivos según la composición del residuo plástico. Las concentraciones de estos compuestos y el tamaño de la cadena molecular dependen en cierta forma del tiempo de reacción y la temperatura a la que se lleva la operación. El poliestireno genera su monómero base (estireno) y concentraciones de oligómeros, en cadenas de trímeros y dímeros (Mesa y Ortiz, 2016).

La generación de productos no deseados se debe a la presencia de aditivos u otro tipo de compuestos presentes en el plástico tales como:

- La presencia de cloro en el plástico además de ser tóxico conlleva a la generación de ácido clorhídrico que corroe el equipo y causa afecciones al sistema respiratorio.
- La formación de compuestos nitrogenados (cianuros, amoníaco, nitritos, etc) se debe a la presencia de nitrógeno en el plástico.
- El ambiente también afecta al proceso de pirólisis puesto que el oxígeno se condensa dentro del reactor y genera agua y otros compuestos oxigenados.
- La presencia de aditivos en el plástico para mejorar sus propiedades genera alta producción de coque y compuestos volátiles tóxicos.

Según UNEP, (2009), el polipropileno, poliestireno y polietileno dan como producto de la pirólisis térmica y catalítica en su mayor proporción fracciones líquidas conocido como aceite pirolítico, por lo tanto, se enfocará en el estudio de la obtención de hidrocarburos con los precedentes mencionados.

## CAPITULO III

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.2. Hipótesis y especificación de las variables

##### 3.1.1. *Hipótesis general*

- Permitirá la ingeniería conceptual de pirólisis térmica de polipropileno y poliestireno la obtención de información de nuevos métodos de tratamiento de desechos plásticos junto con las condiciones de operación más adecuadas y eficientes.

##### 3.1.2. *Hipótesis Específicas*

- Al construir matrices comparativas entre todas las tecnologías existentes se conseguirá establecer la más eficiente y rentable para la pirólisis térmica de polipropileno y poliestireno.
- Con la revisión bibliográfica de la pirólisis térmica de polipropileno y poliestireno se evalúa su rendimiento en la obtención de biocombustibles con otros materiales plásticos.
- Al analizar las tecnologías existentes se establecerá las mejores condiciones de operacionalidad de la pirólisis térmica de polipropileno y poliestireno así como su costo de implementación.

#### 3.2. Identificación de Variables

##### 3.2.1. *Variables independientes*

**Tabla. 1-3:** Identificación de variables independientes

<b>Variables independientes</b>	<b>Unidad</b>
Temperatura	°C
Presión	Atm
Velocidad de calentamiento	°C/seg
Tiempo de Retención	Seg

Tamaño de partícula	Cm
Materia Prima	Kg
Tipo de Reactor	Capacidad (m <sup>3</sup> )
Proceso	Energía requerida (KW/h)

Realizador por: Pinajota Oscar, 2018

### 3.2.2. Variables dependientes

**Tabla. 2.3:** Identificación de variables dependientes

Variables dependientes	Unidad
Productos líquidos	Kg/h
Productos gaseosos	Kg/h
Productos sólidos	Kg/h

Realizador por: Pinajota Oscar, 2018

### 3.2.3. Variables controladas y no controladas

**Tabla. 3.3:** Identificación de variables controladas y no controladas

Variables controladas	Variables no controladas
Temperatura	Velocidad de calentamiento
Presión	Humedad
Tiempo de Retención	Composición del residuo plástico
Tamaño de partícula	

Realizador por: Pinajota Oscar, 2018

### 3.3. Operacionalización de las Variables

**Tabla 4-3:** Operacionalización de las variables dependientes

Variable	Importancia	Indicadores	Unidad
Productos generados	La generación de productos líquidos, sólidos y gaseosos se obtienen proporcionalmente al control de las variables dependientes.	Fracciones: - Líquidas - Gases - Sólidas	Kg/h

**Realizado por:** Pinajota Oscar, 2018

**Tabla 5-3:** Operacionalización de las variables independientes

Variable	Importancia	Indicadores	Unidad
<b>TIEMPO DE RESIDENCIA</b>	El tiempo de residencia del material de alimentación en el reactor es uno de los principales factores que deciden el tipo de reacción producida y el resultado de la misma.	Fracciones: - Líquidas - Gases - Sólidas	Metros cúbicos
<b>TEMPERATURA</b>	La temperatura es uno de los factores más importantes a considerar puesto que si su valor aumenta disminuye la proporción de productos líquidos favoreciendo las fracciones gaseosa y a su vez sólida. El aumento de la temperatura favorece las reacciones secundarias de los productos de pirólisis, aumentando la aparición de productos de menor tamaño, así como las reacciones terciarias en las que tienen lugar la condensación de productos y la deposición de sólido carbonoso	- Entre 330 °C y 450 °C la fracción líquida alcanza rendimientos significativos, mientras que los compuestos gaseosos se generan en mucha menor medida. - A temperaturas superiores a 500 °C se produce un mayor craqueo del plástico pirolizado y por tanto se obtiene un mayor rendimiento de la fracción gaseosa. - A partir de 700 °C la fracción sólida comienza a tener un peso significativo, incluso se llega a establecer una relación directamente proporcional entre el rendimiento de la fracción gaseosa y sólida masa transferencia	- Temperatura °C, °K - Fracciones gaseosas, líquidas y sólidas
<b>PRESIÓN</b>	A medida que la presión aumenta, la fracción gaseosa aumenta, pero la mayoría de reactores de pirólisis trabajan a ventilación abierta.	Presión atmosférica	Fracción de productos obtenidos
<b>VELOCIDAD DE CALENTAMIENTO</b>	Es un parámetro que indica la velocidad a la que se produce la descomposición química del plástico y su dependencia con el producto obtenido.	- Pirólisis Flash comprendida en velocidades de calentamiento superiores a os 250°C/s - Pirólisis lenta que varía entre unidades y decenas de °C/s.	Fracciones de los productos obtenidos



<b>TAMAÑO DE PARTÍCULA</b>	El tamaño de la partícula influirá directamente a la velocidad de calefacción por el tiempo que tarda en la transferencia de calor a lo largo de la superficie del plástico y de allí a la calidad y cantidad de producto generado.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pirólisis completa</li> <li>- Pirólisis incompleta</li> </ul>	Fracción de productos obtenidos
<b>HUMEDAD</b>	El contenido de agua presente en los residuos plásticos determinará el tiempo de reacción y con ello la generación de productos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pirólisis rápida</li> <li>- Pirólisis lenta</li> <li>- Pirólisis Flash</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fracción de productos obtenidos</li> <li>- Pureza</li> <li>- Concentración</li> </ul>
<b>MATERIA PRIMA</b>	La materia prima es un factor a considerar de mucha importancia puesto de no todos los plásticos están compuestos de las mismas cadenas poliméricas por lo que los hace muy distintos entre sí con la consecuencia de que cada uno de ellos debe ser tratado de manera distinta a condiciones diferentes.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cantidad de materia prima alimentada.</li> <li>- Densidad del plástico (polipropileno y poliestireno)</li> <li>- Composición del plástico (polipropileno y poliestireno)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kg/h</li> <li>- Kg/m<sup>3</sup></li> </ul>
<b>TIPO DE REACTOR</b>	El tipo de reactor es fundamental para el estudio de la pirólisis térmica puesto de cada uno tiene características y funcionalidad muy distinta lo que afecta directamente a las variables del proceso de manera directa. Por tal motivo cabe su análisis de manera independiente	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reactor de tornillo</li> <li>- Reactor de extracción</li> <li>- Reactor de tanque agitado</li> <li>- Reactor de lecho fijo</li> <li>- Reactor de lecho fluidizado</li> <li>- Autoclave</li> <li>- Reactor de esferas</li> <li>- Reactor riser</li> <li>- Reactor de cono rotatorio</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Capacidad del reactor (Kg/m<sup>3</sup>h)</li> <li>- Rendimiento del reactor (Kg producto/Kg de materia prima)</li> </ul>
<b>PROCESO</b>	El proceso es muy fundamental puesto que dependerá en su totalidad del tipo de producto que se requiera obtener y para lograr dicho objetivo se verán involucradas las variables del proceso y diseño, así como el tipo de reactor a utilizar.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Energía requerida (Combustible, gasificación, etc.)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Energía eléctrica consumida/hora</li> <li>- Temperatura necesaria /Kg residuo plástico</li> </ul>

Realizado por: Pinajota Oscar, 2018

### 3.4. Matriz de consistencia

**Tabla 6-3.** Matriz de consistencia

ASPECTOS GENERALES				
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	OBJETIVO		HIPÓTESIS	
Los plásticos han reemplazado a muchos materiales tradicionales como los metales, maderas, cerámicas, etc., en muchas de sus aplicaciones por lo cual la producción de plásticos para abastecer el consumo local ha crecido exponencialmente.	<b>Objetivo General</b>  Desarrollar una ingeniería conceptual para el proceso de pirólisis térmica de residuos plásticos de polipropileno y poliestireno.		<b>Hipótesis General</b>  Permitirá la ingeniería conceptual de la pirólisis térmica de polipropileno y poliestireno la obtención de información de nuevos métodos de tratamiento de desechos plásticos junto con las condiciones de operacionalidad más adecuadas y eficientes, así se facilitará la implementación a futuro.	
ASPECTOS ESPECÍFICOS				
PROBLEMAS ESPECÍFICOS.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECIFICAS	VARIABLES	METODOLOGÍA
La acumulación de desechos plásticos en botaderos de basura se ha incrementado de manera violenta sin regulación y cada vez se requiere más espacio para desechar estos productos.  El tiempo de descomposición de los desechos plásticos según la Organización de Naciones Unidas (ONU) tarde desde 50 a 1000 años dependiendo de su composición y uso.  Falta de aplicación de sistemas de reciclaje con el objetivo de	Analizar las tecnologías existentes para los procesos de pirólisis térmica de plásticos polipropileno y poliestireno.  Construir matrices comparativas y de evaluación de las diferentes tecnologías y procesos existentes para la pirólisis térmica de plásticos.	Al construir matrices comparativas entre todas las tecnologías existentes se conseguirá establecer la más eficiente y rentable para la pirólisis térmica de polipropileno y poliestireno.	<b>Tiempo De Residencia</b> El tiempo de residencia del material de alimentación en el reactor es uno de los principales factores que deciden el tipo de reacción producida y el resultado de la misma.  <b>Temperatura</b> La temperatura es uno de los factores más importantes a considerar puesto que si su valor aumenta disminuye la proporción de productos líquidos favoreciendo las fracciones gaseosa y a su vez sólida. El aumento de la temperatura favorece las reacciones secundarias de los productos de pirólisis, aumentando la aparición de	<b>Tipo y Diseño de la Investigación</b> La presente investigación se desarrolla con un modelo de investigación conceptual. Por el hecho de buscar y establecer la mejor tecnología existente a disposición para la implementación de un proceso de pirólisis térmica eficiente, rentable y de fácil operacionalidad, se escogerá el que mejor se ajuste a las exigencias de la realidad del país.

<p>reutilizar los productos plásticos puesto que estos tienen un tiempo de vida ilimitado y su aplicación abarca grandes campos.</p>	<p>Analizar variables de diseño de cada una de las tecnologías, así como los costos de implementación</p>	<p>Con la revisión bibliográfica de la pirólisis térmica de polipropileno y poliestireno se evalúa su rendimiento en la obtención de biocombustibles con otros materiales plásticos.</p> <p>Al analizar las tecnologías existentes se establecerá las mejores condiciones de operacionalidad de la pirólisis térmica de polipropileno y poliestireno así como su costo de implementación.</p>	<p>productos de menor tamaño, así como las reacciones terciarias en las que tienen lugar la condensación de productos y la deposición de sólido carbonoso.</p> <p><b>Presión</b> A medida que la presión aumenta, la fracción gaseosa aumenta, pero la mayoría de reactores de pirólisis trabajan a ventilación abierta.</p> <p><b>Velocidad De Calentamiento</b> Es un parámetro que indica la velocidad a la que se produce la descomposición química del plástico y su dependencia con el producto obtenido.</p> <p><b>Tamaño de partícula</b> El tamaño de la partícula influirá directamente a la velocidad de calefacción por el tiempo que tarda en la transferencia de calor a lo largo de la superficie del plástico y de allí a la calidad y cantidad de producto generado.</p> <p><b>Humedad</b> El contenido de agua presente en los residuos plásticos determinará el tiempo de reacción y con ello la generación de productos.</p>	<p>Se evaluará cada una de las diferentes variables como tiempo de residencia del material plástico en el reactor, temperatura, presión, velocidad de calentamiento, tipo de reactor, proceso y materia prima, con los que se busca mayor rentabilidad y eficiencia.</p> <p><b>Técnica de Recolección de Datos</b> La recolección de datos se realizará mediante la investigación de artículos científicos relacionados con la pirólisis térmica, procesos y tecnologías ya existentes, en donde se analizará cada una de las variables que influyen en el proceso principalmente del poliestireno y polipropileno y se seleccionará el proceso más idóneo que mejor satisfaga el tratamiento de los residuos plásticos.</p>
--	---	---	--	--

**Realizado por:** Pinajota Oscar, 2018

### **3.5. Tipo y Diseño de la Investigación**

El desarrollo de una investigación documental que abarca el estudio de la pirólisis térmica de polipropileno y poliestireno junto con el análisis de variables de proceso, operacionalidad, basado en la recopilación de información y experimentación de varios autores y empresas dedicadas al desarrollo de técnicas y tecnología de tratamiento de residuos plásticos.

#### **3.5.1. Método Deductivo**

El método deductivo consiste en la totalidad de reglas y procesos, mediante el cual podemos llegar a conclusiones finales a partir de enunciados supuestos llamados premisas. El principal problema son los parámetros se ve establecido por la condición de operacionalidad que representan un papel muy importante.

#### **3.5.2. Método Inductivo**

Se analizará los problemas ocasionados por el exceso de desechos plásticos, determinando soluciones y alternativas acorde a lo que los investigadores y autores de literatura han propuesto.

#### **3.5.3. Método Investigativo**

La presente investigación se desarrolla con un modelo de investigación conceptual. Por el hecho de buscar y establecer la mejor tecnología existente a disposición para la implementación de un proceso de pirólisis térmica eficiente, rentable y de fácil operacionalidad, se escogerá el que mejor se ajuste a las exigencias de la realidad del país.

Se evaluará cada una de las diferentes variables como tiempo de residencia del material plástico en el reactor, temperatura, presión, velocidad de calentamiento, tipo de reactor, proceso y materia prima, con los que se busca mayor rentabilidad y eficiencia.

### 3.5.4. *Unidad de Análisis*

La cantidad de desechos plásticos producidos y reciclados para tratamiento estará en función de datos obtenidos y experimentaciones ya finalizadas para la comparación y discusión de resultados.

### 3.5.5. *Técnica de Recolección de Datos*

Dado que es un proyecto de tipo investigativo, y se recolecta datos de bibliografía las técnicas aplicadas que se utilizaron en la recolección de investigaciones se detallan a continuación:

- ✓ Búsqueda en libros, materia web y revistas científicas técnicas de diseño de plantas
- ✓ Interpretación y selección de la información que se establecen en las diferentes investigaciones.

Análisis de la selección de investigaciones para el uso en las técnicas de ingeniería conceptual

#### 3.5.5.1. *Revisión Bibliográfica*

Para la investigación y recopilación bibliográfica se ha considerado tomar en cuenta que la información recopilada en este trabajo sea la mas actual posible y abarque todo el campo de la pirólisis térmica de polipropileno y poliestireno ajustándolo a la realidad del país y generando una propuesta que satisfaga las necesidades existentes.

**Tabla 7-3.** Matriz bibliográfica

AUTOR	TITULO	AÑO
<b>Hernández Remedio</b>	Evaluación de la Pirólisis Térmica y Catalítica de Polietileno en Lecho Fluidizado como Técnica de Reciclado. Influencia de las Variables sobre los Productos Generados. En E. d. Generados, <i>Remedio Hernández Ferez</i> . Universidad de Alicante	2002
<b>Mesa y Ortiz</b>	Evaluación del proceso de pirólisis para la producción de diesel a nivel laboratorio a partir de residuos plásticos de industrias de alimentos	2016
<b>Frers C</b>	Los problemas de la basura y una posible solución	2009
<b>Aracil Ignacio</b>	Formación de contaminantes y Estudio Cinético de la Pirólisis y Combustión de Plásticos (PE, PPVC y PCP). En	2008

	A. I., <i>Tesis Doctoral</i>	
<b>Serrano D</b>	Reciclado Químico de Plásticos	2001
<b>Association of Plastics Manufactures in Europe (APME)</b>	Analysis of Plastics Consumption and Recovery in Europe. En A. o. (APME), <i>Analysis of Plastics Consumption and Recovery in Europe</i>	2002
<b>CONESA.</b>	Estudio de la Pirólisis de Residuos Plásticos del Polietileno y Neumáticos Usados. <i>Universidad de Alicante.</i>	1996
<b>Westerhout y otros</b>	Kinetics of the low-temperature pyrolysis of polyethene, polypropene, and polystyrene modelling, experimental determination and comparison with literature models and data	1997
<b>Sullivan A. y Ball R.</b>	Thermal decomposition and combustion. En S. A. Ball, <i>Thermal decomposition and combustion Atmospheric Environment</i>	2012
<b>Sing B, y Sharma N</b>	Mechanistic implications of plastic degradation. <i>Polym Degrad Stabil</i>	2008
<b>Scheirs J, y Kaminski W.</b>	<i>Feedstock Recycling and Pyrolysis of Waste Plastics: Converting Plastics into Diesel and Other Fuels.</i>	2006
<b>Salinas, Villacis y Vazquez.</b>	Diseño y Construcción de un Sistema de Combustión para la Caracterización Térmica de Desechos Plásticos. Utilizados como Combustible Alternativo.	2010
<b>Proaño Oswaldo y Crespo Sara.</b>	Obtención de combustibles a partir de residuos plásticos. <i>Revista Politécnica,</i>	2009
<b>Mancheno Myrian.</b>	Aprovechamiento Energético de Residuos Plásticos Obteniendo Combustibles Líquidos, Por Medio de Pirólisis. <i>Ciencias de la Vida, 2</i>	2015
<b>Steinvorth</b>	Aprovechamiento energético de residuos sólidos municipales mediante el uso de tratamientos térmicos de avanzada	2014
<b>UNEP</b>	Converting Waste Plastics into a Resource: Compendium of Technologies	2009

Realizado por: Pinajota Oscar, 2018

## CAPITULO IV

### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. Análisis de Resultados

##### 4.1.1. *Esquema de la influencia de la temperatura en la pirólisis térmica*

La pirólisis es un proceso de degradación de compuestos orgánicos por acción de la temperatura, siendo la temperatura es una variable fundamental en este proceso además de comprender la transferencia de calor que se da entre el medio y el polímero ayudara a entender el comportamiento de los materiales lignocelulósicos y polímeros en la degradación térmica (Aldea et al., 1997).

La acción de la temperatura en la degradación de moléculas orgánicas es el rompimiento de los enlaces covalentes que unen a los átomos de carbono, a esta se la conoce como Fuerza de Van der Walls que colapsan por la vibración molecular que la temperatura produce rompiendo los enlaces Carbono-Carbono.

En la distribución de los productos finales la temperatura ayuda a mejorar el rendimiento de fracciones útiles como gases de combustión y biocombustibles y disminuye la obtención de cenizas o coque.

Marcilla A. et al., (2007), estudio la degradación de Poliestireno HIPS (mezcla de estireno y butadieno) en la cual se comprobó que al incrementar la temperatura de reacción la degradación aumento de un 60% a un 75% y también mejorando la eficiencia de los productos obtenidos.

Czernik et al., (1990), observo en su estudio que mientras mayor es la temperatura de degradación de los polímeros mayor es su rendimiento y que a temperaturas menores a 700 °C la mayor parte del producto producido fue sólida, mientras que a mayor las temperaturas el producto principal era un gas.

Muchos estudios demuestran que la acción de la temperatura juega un papel más importante en la distribución de productos finales en comparación con el tiempo de residencia, y mientras mayor es la temperatura aumenta la concentración de productos finales (Kuipers et al., 1998).

En conclusión, la temperatura es la variable más importante en el proceso de pirolisis térmica y el rendimiento de fracciones gaseosas no condensables se ve favorecida a mayor sea la temperatura de degradación de los polímeros y también las fracciones sólidas y en menor rendimiento las fracciones líquidas. Además, el aumento de la temperatura favorece las reacciones secundarias obteniendo así moléculas de menor tamaño de C<sub>1</sub>-C<sub>7</sub>, también aumenta la deposición de carbono sólido (Berenguer, 2008).

Según Proaño y Crespo, (2009) a temperaturas menores a 300°C se obtiene como principal producto un material sólido (coque) o cenizas del material que no se pirolizo, a temperaturas mayores a esta se obtiene rendimientos del poliestireno (PS) 68.55% de líquidos, 12.7% de gases y 18.75% de coque, en la degradación de polietileno de baja densidad (PEAD) 47.18% de líquidos, 24.63% de gases y 28.19% de sólidos, y por ultimo Tereftalato de polietileno (PET) se obtuvieron rendimientos 2.13% líquidos, 87.51% de gases y 10.36% de sólidos. Siendo el poliestireno el residuo plástico que da mayores fracciones líquidas que pueden ser utilizadas como biocombustibles u otras materias primas (Cheon y Lee, 2009)

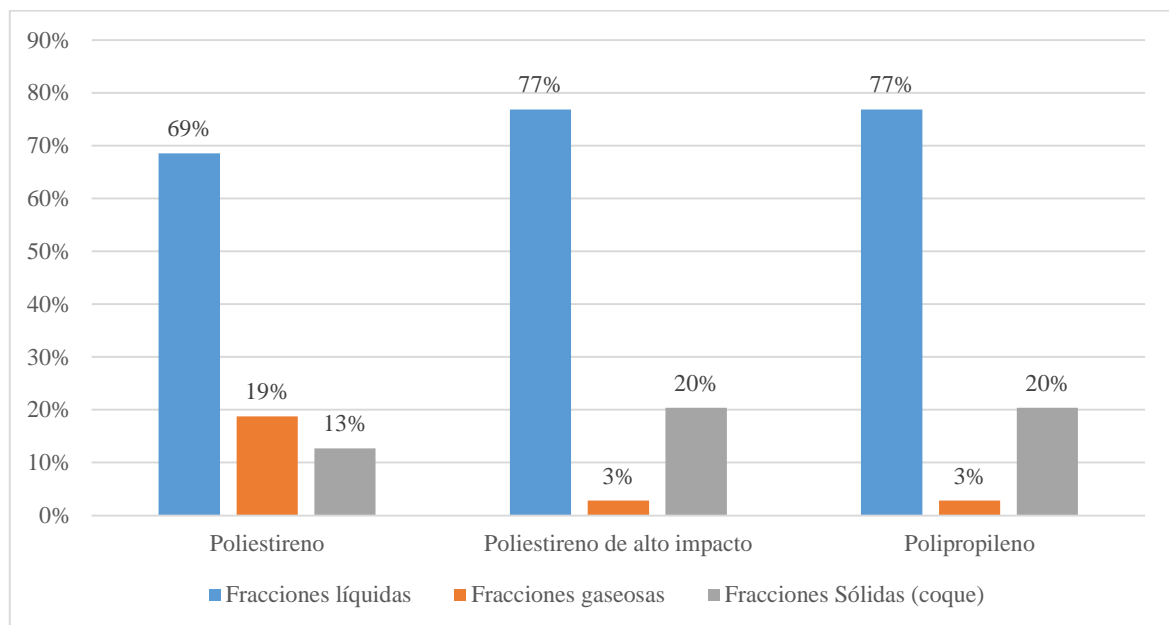
**Tabla 1-4.** Esquema de la influencia de la temperatura sobre la pirolisis térmica

Tipo de polímero	Temperatura de fusión (°C)	Productos		Referencia
Poliestireno PS	270	Líquidas	68.55%	(Proaño O y Crespo S, 2009) (Cheon y Lee, 2009).
		Gases	18.75%	
		Coque	12.7%	
Poliestireno HIPS	230-270	Líquidas	76.84%	(Mohammad y Moinuddin, 2013) (Cheon y Lee, 2009).
		Gases	2.8%	
		Coque	20.36%	
Polipropileno PP	650	líquidas	76.84%	(Mohammad y Moinuddin, 2013)
		Gases	2.8%	
		Coque	20.36%	

Realizado por: Pinajota Oscar, 2018



Los datos descritos en la tabla anterior son el resultado de la experimentación de varios autores, los cuales se comparan en el grafico siguiente, además toman como punto de partida su punto de fusión, sus propiedades termodinámicas y la utilización de únicamente el residuo plástico limpio y libre de contaminantes.



**Gráfico 1-4.** Influencia de la temperatura sobre la pirólisis térmica.

**Realizado por:** Pinajota Oscar, 2018

La temperatura es el factor fundamental para la pirólisis térmica de polipropileno y poliestireno y polietileno tal como lo menciona (UNEP, 2009), el su compendio tecnológico pues dan como productos mayoritarios fracciones líquidas (aceite pirolítico). Para analizar el rendimiento del la pirólisis térmica a diferentes niveles de temperatura se tomara como línea de partida el estudio realizado por (Mesa y Ortiz, 2016), en el cual se analiza las variables que influyen directamente en el proceso.

Se estudia la temperatura como una variable de importancia tomando en cuenta tres valores representativos 550°C, 600°C y 650°C debido a que:

- A 550°C se descompone de forma parcial la materia plástica ingresada al reactor.
- A 600°C le logra la mayor pirólisis de compuestos poliolefínicos.

- A 650°C o superiores se generan en mayor proporción fracciones gaseosas, las cuales requieren de un complejo proceso de condensación.

Tomando en consideración estos criterios, una masa de alimentación real de 0.5 Kg de residuo plástico general y 0.025kg de contaminantes varios, se tiene:

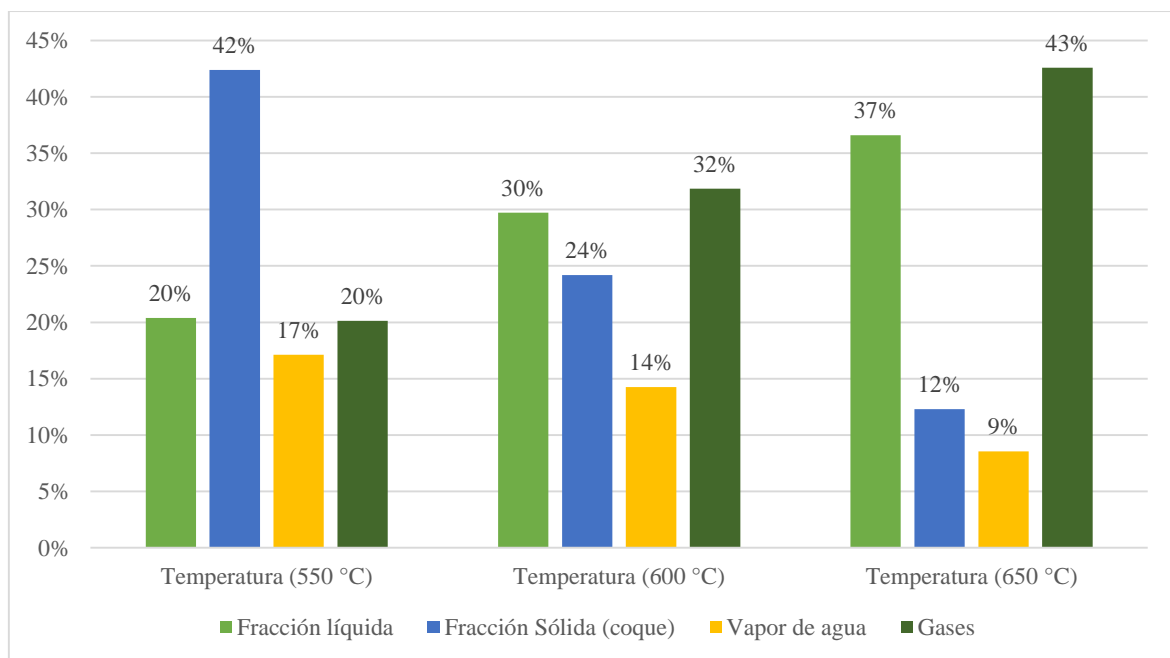
**Tabla 2-4.** Rendimiento de aceite pirolítico a 550°C, 600°C y 650 °C

Temperatura (°C)	Aceite pirolítico (g)	Rendimiento (%)	Coque (%)	Vapor de agua (%)	Gases (%)
<b>550</b>	107	20.38	42.39	17.12	20.13
<b>600</b>	156	29.72	24.19	14.27	31.84
<b>650</b>	192	36.58	12.29	8.56	42.59

**Fuente:** (Mesa y Ortiz, 2016). Productos obtenidos en la pirólisis térmica de residuos.

**Realizado:** Oscar Pinajota, 2018

Estos son los resultados obtenidos a diferentes temperaturas, el mayor rendimiento de aceite pirolítico se produce a 650°C con un total de 36.58% lo que representa una generación de 192 gramos de aceite, menor producción de coque y agua y mayor de fracciones gaseosas.



**Gráfico 2-4.** Rendimiento de la pirólisis térmica a 550°C, 600°C y 650°C

**Realizado por:** Pinajota Oscar, 2018

#### ***4.1.2. Esquema de la influencia del reactor en la pirolisis térmica.***

La influencia del tipo de reactor en el proceso de pirolisis térmica radica en el rendimiento de las fracciones útiles como los gases y líquidos (biocombustibles), a diferencia de la temperatura es una variable de menor importancia pero cuya selección ayuda que las variables restantes eleven el rendimiento en la degradación de polímeros considerablemente.

En el estudio realizado por (Mancheno, 2015) se utilizó un reactor Batch (reactor discontinuo con agitador), que trabajo en un rango de temperatura de 320 a 500°C donde se pirolizó tres plásticos PET, PS y PEAD obteniéndose tres fracciones las cuales se analizaron en un cromatógrafo de gases donde se determinó que el PEAD y PS se obtienen hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs), que forman parte de los biocombustibles y derivados del petróleo.

También se utilizó un reactor Batch que trabajo en el rango de 300 a 400°C en el cual se degrado polietileno de alta densidad (PEAD), el porcentaje de degradación de este polímero fue alrededor del 78% obteniéndose fracciones liquidas alrededor del 76.19%, gases 4.3% y solidas o cenizas 19.512%, en donde en la fracción liquida se analizó un amplio abanico de productos como de gasolina ( $C_5 - C_{10}$ ), Kerosene ( $C_{10} - C_{16}$ ), y diésel ( $C_{14} - C_{20}$ ) (Proaño O y Crespo S, 2009).

Los análisis termogravimétricos es un proceso de grandes facilidades operacionales pero ineficiente para la obtención de fracciones gaseosas y liquidas pues da altos rendimientos de cenizas, este proceso se utiliza para el estudio de la cinética de pirolisis térmica y de la energía de activación ( $E_a$ ).

Los bajos rendimientos de los análisis termogravimétricos se comprobaron con la utilización de un Termobalanza Netzsch TG 209 para la degradación de poliestireno HIPS, la degradación de este polímero fue menor al 60% lo cual el 40% restante fueron cenizas y material no degradado (Marcilla A. et al., 2007).

La utilización de un reactor de lecho fluidizado para la degradación de polietileno lineal de baja densidad (LLDPE) cuyo porcentaje de degradación polimérica fue mayor al 70%, donde los mayores rendimientos se alcanzaron a los 55 minutos de reacción (McCaffrey, W. et al., 1995).

La degradación de poliestireno (PS) y polipropileno (PP) a nivel de laboratorio fue realizada por (Mohammad y Moinuddin, 2013) el cual utilizó un proceso de destilación fraccionada continua, con un rango de temperatura de 285 a 400°C y tiempo de residencia de 6 horas, donde el primer balón se coloca los residuos de estos dos polímeros en proporción 50:50 y se obtuvo una degradación del 87% con fracciones liquidas alrededor de 76.84%, gases 20.36% y solidos 2.8%.

**Tabla 3-4.** Influencia del tipo de reactor utilizado en pirolisis Térmica

Reactor	Porcentaje de Degradación	Rendimiento	Referencia
Equipo de destilación fraccionada	>87%	Liquidas 76.84% Gases 20.36% Coque 2.8%	(Mohammad y Moinuddin, 2013)
BATCH Tanque agitado	78%	Liquidas 76.19% Gases 4.3% Coque 19.512%	(Mancheno, 2015) (Proaño O y Crespo S, 2009)
Análisis termogavimetrico	<60%	Liquidas y Gases 60% Coque 40%	(Marcilla A. et al., 2007)
Lecho Fluidizado FC	>70%	Sin especificación	(McCaffrey, W. et al., 1995)
Lecho fijo	87%	Liquidas 20% Gases 67% Coque 13%	(Hall, W. et al., 2007)

Realizado por: Pinajota Oscar, 2018.

#### **4.1.3. Esquema de influencia del tiempo de residencia en la pirolisis térmica**

El tiempo de residencia de un polímero es uno de los factores más importantes que rige en la pirolisis afectando la obtención de los productos finales, Ludlow-Palafox y Chase (2001) mientras mayor es el tiempo de residencia de la partícula aumenta la cantidad de gases no condensables.

Esto se corrobora en el estudio realizado por Mastral, (2002), estudio el efecto del tiempo de residencia en la distribución de los productos de pirolisis a una temperatura de 640°C la principal fracción obtenida fue ceras liquidas con un rendimiento de 79.7% a 0.8 seg, y al tiempo de 1.5 seg disminuyo a 68.5%, mientras que la fracción gaseosas en los mismos intervalos de tiempo fue de 11.4% a 31.5%.

Además de altos rendimientos de las fracciones gaseosas debido al tiempo de residencia prolongado se dan reacciones secundarias en las cuales aumento la deposición de solidos carbonosos (coque), en un tiempo de 90 minutos el coque fue de 13.4% y a un tiempo de 120 minutos subió a 14.3% (Onwudilia y Williams, 2016). Según el tiempo de residencia del polímero en el reactor se puede clasificar en: convencional (el tiempo de residencia puede ser de varias horas e incluso días), rápida (minutos a horas) y flash (segundos a minutos) (Balat, H; et al., 2009).

Los rendimientos de las fracciones gaseosas, liquidas y solidas dependerá del tiempo de residencia de los polímeros y de la temperatura mientras mayor es el tiempo mayor la cantidad de coque y gases, mientras menor la fracción liquida tienen mayores rendimientos. En los estudios realizados por Mohammad y Moinuddin, (2013) en la degradacion de poliestireno y polipropileno a una temperatura de 285-400°C, el tiempo de residencia fue menor a 20 minutos las fracciones liquidas fueron de 76-84%, Myrian Mancheno (2015) degrado poliestireno con un tiempo de residencia de 30 minutos con rendimiento de 68.55%, Edwin G. (2011), pirolizó poliestireno con un tiempo de residencia inferior a 50 minutos la degradación del polímero fue de 66.3%. A continuación, se enlista los resultados obtenidos por varias investigaciones tomando la materia prima como un residuo puro libre de contaminantes externos.

**Tabla 4-4.** Esquema de la influencia del tiempo de residencia en la pirólisis térmica.

Tipo de polímero	Tiempo de Residencia	Temperatura (°C)	Productos		Referencia
Poliestireno	0.8 -1.5 seg	640°C	Líquidos	79.7%	(Mastral F. et al., 2002)
			Sólidas	9.9%	
			Gaseosos	11.4 %	
	90 min	780°C	Gaseosos	13.4 %	
	120 min	850°C	Gaseosos	14.3%	
Polipropileno y poliestireno	<20 min	285-400°C	Líquidos	76-84%	(Mohammad y Moinuddin, 2013)
Poliestireno	<30 min	110-320°C	Líquidos	68.55%	(Mancheno, 2015)
Poliestireno	<50 min	300-500°C	Líquidos	66.3%	(Edwin G. et al., 2011)
Polipropileno, poliestireno y otros	6 horas	-----	Líquidos	68.44%	(Mohammad y Moinuddin, 2013)
			Sólidas	11.2%	
			Gaseosos	20.36%	

**Realizado por:** Pinajota Oscar, 2018.

Los datos de la tabla anterior muestran resultados obtenidos mediante experimentación con sus residuos plásticos libre de impurezas y con un nivel de pureza relativamente alto, por otro lado para poder aplicarlos a la realidad se debe tener en consideración factores como la presencia de contaminantes y residuos de distinta clase de polímeros.

Mesa y Ortiz, 2016, plantean el análisis tomando como referencia 2, 3, 4, 5 y 6 horas para obtener el mayor rendimiento posible para una pirólisis de residuos plásticos cuyos principales productos son polipropileno, poliestireno y compuestos varios. Con estos antecedentes se tiene:

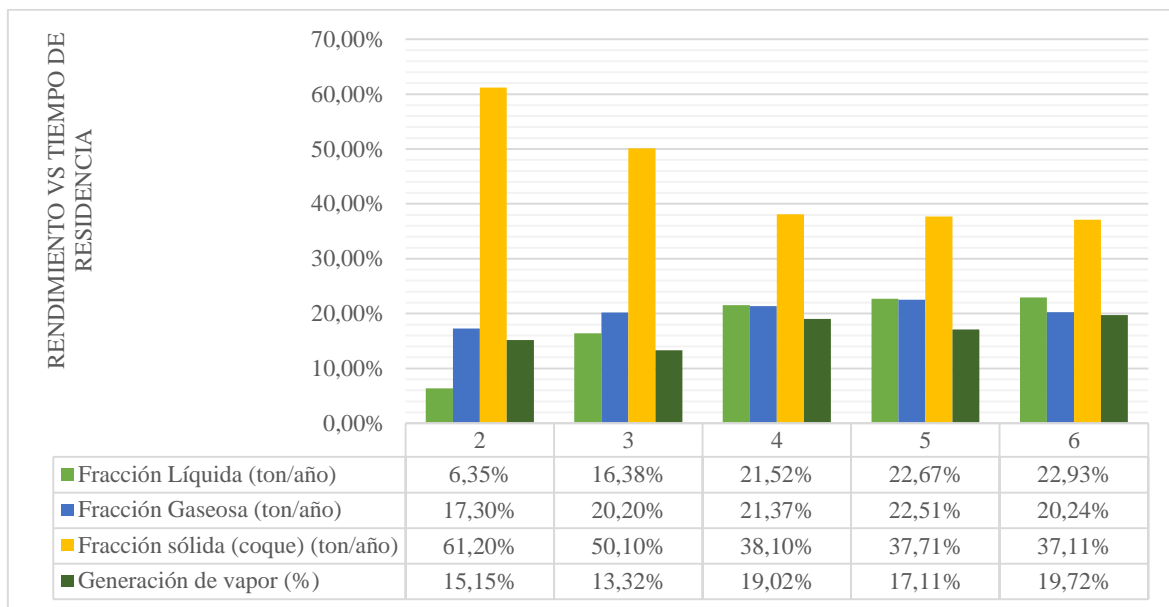
**Tabla 5-4.** Rendimiento vs tiempo de residencia

<b>Tiempo (h)</b>	<b>Rendimiento Fracción líquida (%)</b>	<b>Rendimiento fracción gaseosa (%)</b>	<b>Rendimiento fracción sólida (%)</b>	<b>Generación de vapor de agua (%)</b>
<b>2</b>	6.35	17.3	61.2	15.15
<b>3</b>	16.38	20.2	50.1	13.32
<b>4</b>	21.52	21.37	38.1	19.02
<b>5</b>	22.67	22.51	37.71	17.11
<b>6</b>	22.93	20.24	37.11	19.72

**Fuente:** (Mesa y Ortiz, 2016). Rendimiento de productos en función del tiempo de residencia

La mayor generación de fracciones aprovechables se produce en un tiempo de residencia de 5 horas con una generación de 22.67% de líquidos, 22.51% de gases, 37.71% de sólidos y 17.11% de vapor de agua.

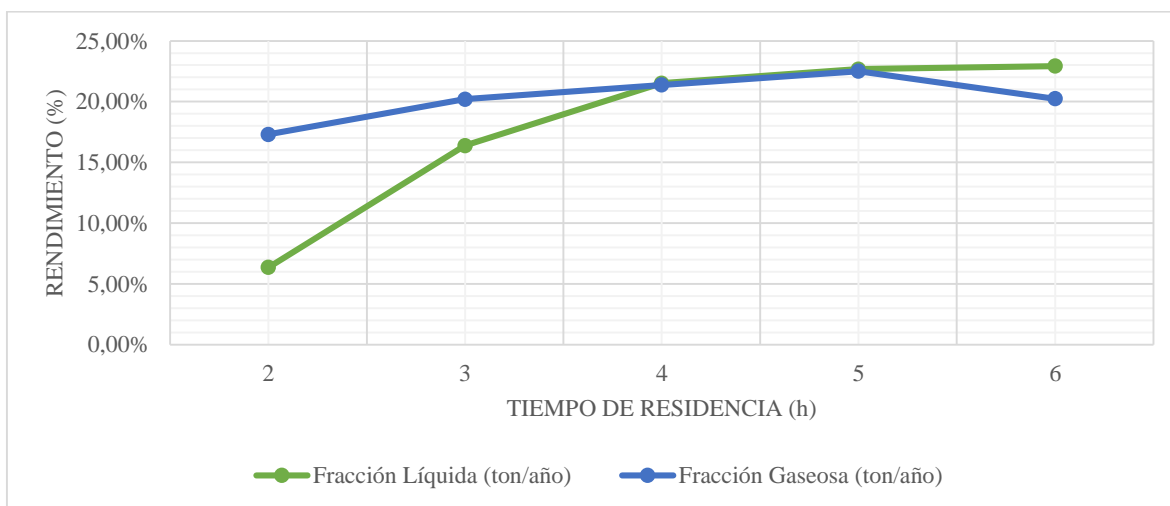
Se ha considerado este límite de tiempo puesto que es en este instante donde se produce la mayor generación de compuestos gaseosos cuyo valor significa que el plástico se ha descompuesto en su totalidad y un mayor tiempo de residencia se considera innecesario por tal motivo su porcentaje descende, un valor a tener en cuenta es el rendimiento de líquidos a tiempos superiores del mencionada pero esto se debe a factores secundarios como la condensación de gases efecto de la acumulación.



**Gráfico 3-4.** Generación de productos en función del tiempo de residencia

Realizado por: Pinajota Oscar, 2018

Los productos que tienen más interés en la pirólisis térmica de polipropileno y poliestireno son las fracciones líquidas y gaseosas por lo que el tiempo de residencia es muy importante como se mencionó anteriormente, a continuación se muestra la evolución del rendimiento frente al tiempo de residencia. Por tal motivo se considera que un tiempo de residencia de 5 horas es el adecuado para obtener el máximo de los productos de la pirólisis.



**Gráfico 4-4.** Rendimiento de las fracciones líquida y gaseosa frente al tiempo de residencia de 5 horas.

Realizado por: Pinajota Oscar, 2018

#### ***4.1.4. Esquema de la influencia del tamaño de la partícula de polímero en la pirólisis térmica.***

Rohit Kumar (2016), pirolizaron una mezcla de residuos plásticos (PSW): polietileno (PE), poliestireno (PS), polipropileno (PP) y tereftalato de polietileno (PET) a una temperatura entre 450 y 600 °C para obtener productos gaseosos ricos en olefinas con alto contenido de H<sub>2</sub>, en donde el rendimiento de las fracciones líquidas aumentaron mientras menor era el tamaño del polímero en la alimentación del reactor, y la eficiencia disminuía con el tamaño de mayor del polímero.

Con este estudio se puede concluir que el tamaño de la partícula influye en la obtención de fracciones deseadas, pero esta variable también depende del acompañamiento de otras variables como son temperatura, tipo de reactor, entre otras.

Mesa y Ortiz, (2016), sugieren un tamaño de partícula dependiendo del espesor del plástico de 4x3 cm pues permite una mayor transferencia de calor y evita la aglomeración a bajas temperaturas.

#### ***4.1.5. Esquema de la influencia de la materia prima utilizada en la pirólisis térmica***

La cantidad de productos finales obtenidos depende de la estructura del polímero degradado en el proceso de pirólisis, varios estudios revelaron que el poliestireno y polipropileno son los residuos que mayores fracciones líquidas en forma de ceras, biocombustibles y aceites de petróleo.

La estructura del poliestireno es un eteno unido a un anillo aromático, al momento de su desintegración se forma una molécula de benceno que es un compuesto líquido propio de los combustibles y un etileno que es una molécula altamente inestable a altas temperaturas que reaccionan para formar compuestos cíclicos y aromáticos. La estructura del polipropileno es un propeno que de igual manera son moléculas inestables a altas temperaturas y forman moléculas líquidas y si el tiempo de residencia es largo se descomponen para formar metano y a mayores tiempos las fracciones sólidas aumentan (Westerhout, y otros, 1997b).

La contaminación de los residuos plásticos, la humedad presente en la muestra y los tratamientos previos de acondicionamiento de la materia prima afectan directamente en los productos obtenidos por la pirólisis, es por tal motivo que se debe dar la importancia necesaria para efectuar una operación de tales características.



El contenido de humedad para cada residuo plástico se relaciona con fin al que se fabricó (envolturas, almacenamiento, etc.) y las condiciones medio ambientales al momento de su acopio.

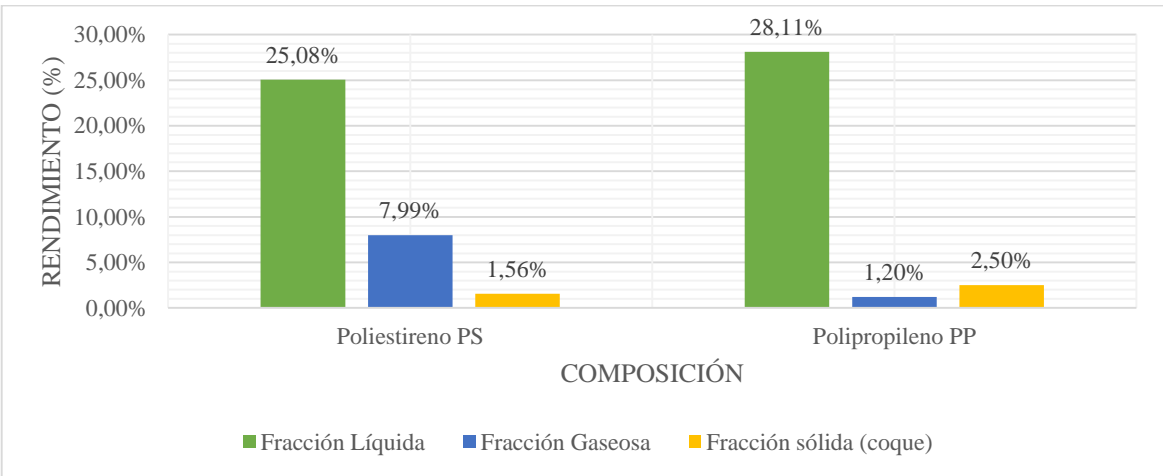
Comparando los resultados de la tabla 2.4 con la tabla 1.4 se tiene una pirólisis térmica de poliestireno y polipropileno de:

**Tabla 6-4.** Datos reales obtenidos de la pirólisis térmica.

Tipo de polímero	Porcentaje de productos ideales		Porcentaje de productos reales		Porcentaje total	
Poliestireno PS	Liquidas	68.55%	Liquidas	36.58%	Liquidas	25.075%
	Gases	18.75%			Gases	7.985%
	Coque	12.7%	Gases	42.59%	Coque	1.56%
Polipropileno PP	Liquidas	76.84%	Coque	12.29%	Liquidas	28.11%
	Gases	2.8%			Gases	1.20%
	Coque	20.36%	Vapor de agua	8.56%	Coque	2.50%

**Realizado:** Oscar Pinajota, 2018

Los datos de la tabla nos indica el contenido de cada fracción (líquida, sólida, gaseosa) para el poliestireno, polipropileno y otros compuestos presentes en una muestra de residuo plástico real con un contenido de contaminantes y humedad tal cual la realidad de los desechos en nuestro país.



**Gráfico 5-4.** Fracciones líquidas, sólidas y gaseosas del poliestireno, polipropileno y otros compuestos

**Realizado por:** Pinajota Oscar, 2018

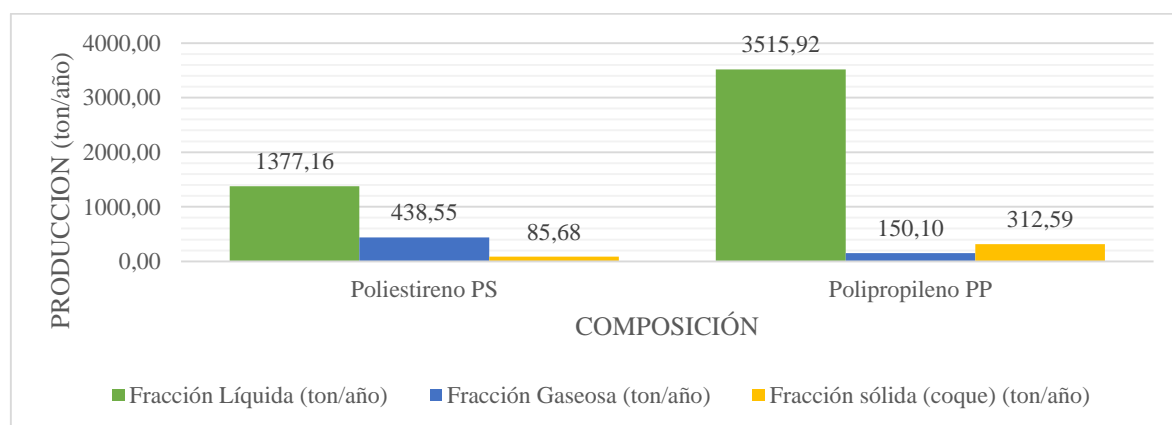
Analizando los datos obtenidos con la producción anual de desechos sólidos del país cuyo aproximado es de 4'410,657.022 ton/año, además sabiendo la composición promedio en cuanto al polipropileno y poliestireno de 2.578% y 1.132% respectivamente (EMGIRS-EP, 2013), se tiene un total de 12,507.74 ton/año de polipropileno y 5,492.15 ton/año de poliestireno.

**Tabla 7-4.** Comparativa de los resultados acoplados a la realidad del Ecuador sin técnicas o métodos de reciclaje.

Tipo de polímero	Producción anual de residuos plásticos (ton/año)	Porcentaje experimental		Producción de fracciones obtenidas de los residuos plásticos (ton/año)	
Poliestireno PS	5,492.15	Liquidas	25.075%	Liquidas	1377.16
		Gases	7.985%	Gases	438.55
		Coque	1.56%	Coque	85.68
Polipropileno PP	12,507.74	Liquidas	28.11%	Liquidas	3515.92
		Gases	1.20%	Gases	150.10
		Coque	2.50%	Coque	312.59

**Realizado:** Oscar Pinajota, 2018

La producción de fracciones líquidas, sólidas y gaseosas para el poliestireno considerando la producción de residuos plástico aproximada en el Ecuador es de 1377.16 ton/año de productos líquidos, 438.55 ton/año de fracciones gaseosas y 85.68 ton/año de coque residual y para el polipropileno 3515.92 ton/año de productos líquidos, 150.10 ton/año de fracciones gaseosas y 312.59 ton/año de coque residual.



**Gráfico 6-4.** Cantidad de fracciones obtenidos como producto de la pirólisis térmica de polipropileno y poliestireno

**Realizado por:** Pinajota Oscar, 2018

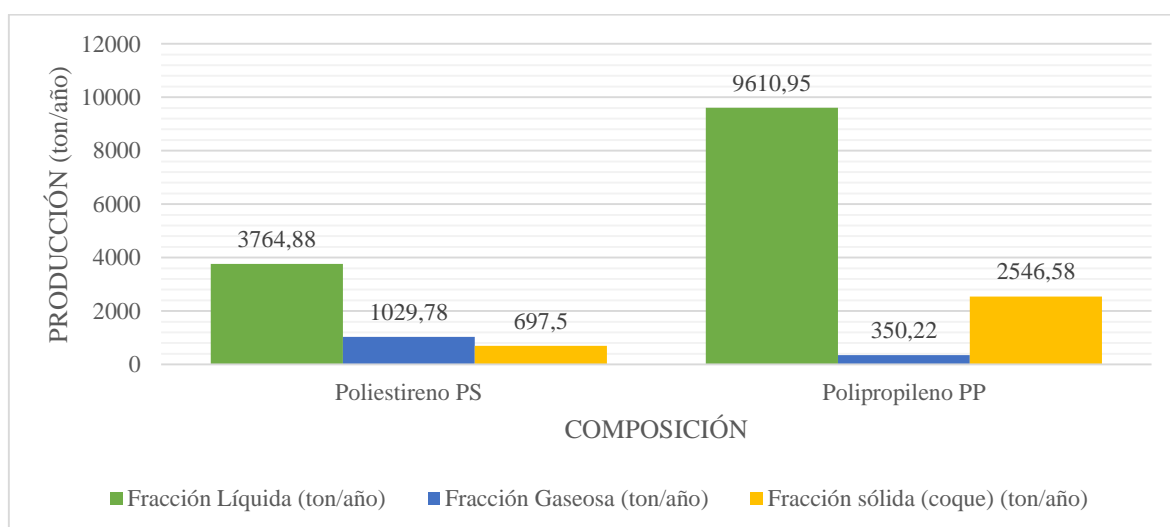
Los datos obtenidos se aplican al proceso de pirólisis térmica sin tratamientos previos de técnicas y métodos de reciclado lo que provoca pérdidas significativas del producto útil deseado, aplicando las técnicas y métodos específicos para la selección y tratamiento de polipropileno y poliestireno se puede alcanzar los siguientes resultados.

**Tabla 8-4.** Producción de compuestos pirolíticos aplicando métodos y técnicas de reciclaje.

Tipo de polímero	Producción anual de residuos plásticos (ton/año)	Porcentaje de obtención de productos (%)		Producción de fracciones obtenidas de los residuos plásticos (ton/año)	
Poliestireno PS	5,492.15	Líquidas	68.55%	Líquidas	3764.88
		Gases	18.75%	Gases	1029.78
		Coque	12.7%	Coque	697.50
Polipropileno PP	12,507.74	Líquidas	76.84%	Líquidas	9610.95
		Gases	2.8%	Gases	350.22
		Coque	20.36%	Coque	2546.58

**Realizado:** Oscar Pinajota, 2018

Con métodos de selección y técnicas de reciclaje adecuadas para el polipropileno y poliestireno se puede alcanzar altos rendimientos los cuales pueden ser reutilizados para el consumo interno nacional, empleados como combustibles previamente refinados o como lubricantes.



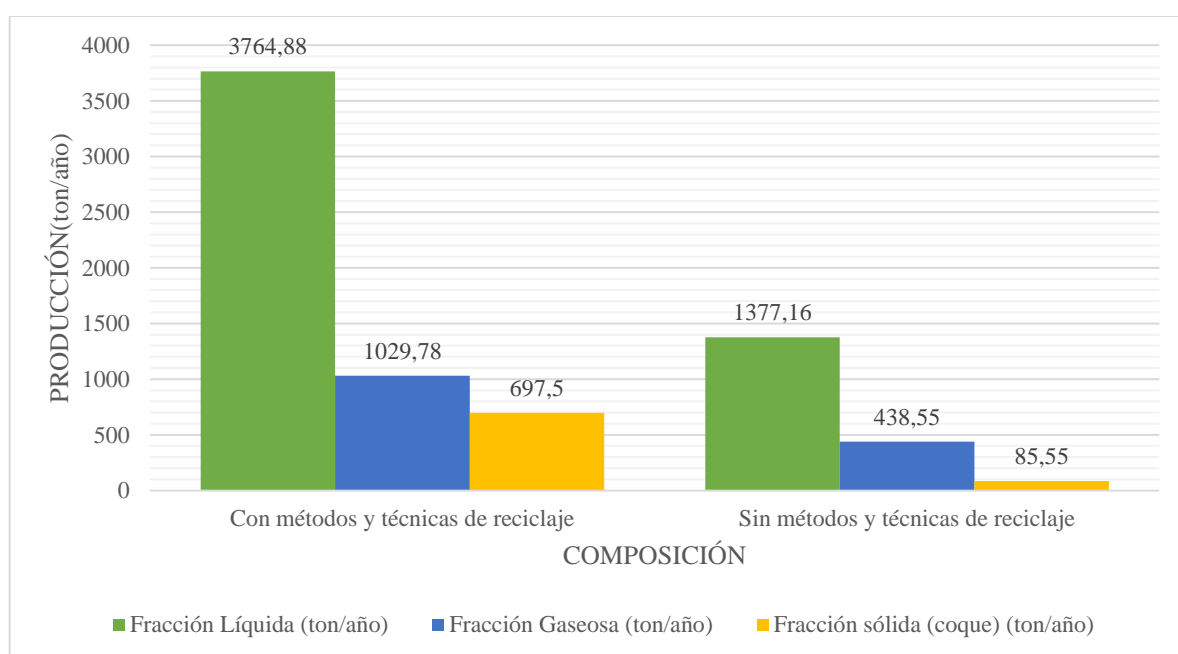
**Gráfico 7-4.** Cantidad de fracciones obtenidos como producto de la pirólisis térmica de polipropileno y poliestireno con métodos y técnicas adecuadas de reciclaje.

**Realizado por:** Pinajota Oscar, 2018

La pérdida de productos pirolíticos por falta de métodos o técnicas de reciclaje causa el desaprovechamiento de la energía y material útil capaz de mejorar las condiciones económicas del país.

Además de reducir al mínimo la acumulación de este tipo de plástico en el medio ambiente reduciendo la explotación de recursos naturales y mejorando las condiciones de vida socio – ambientales.

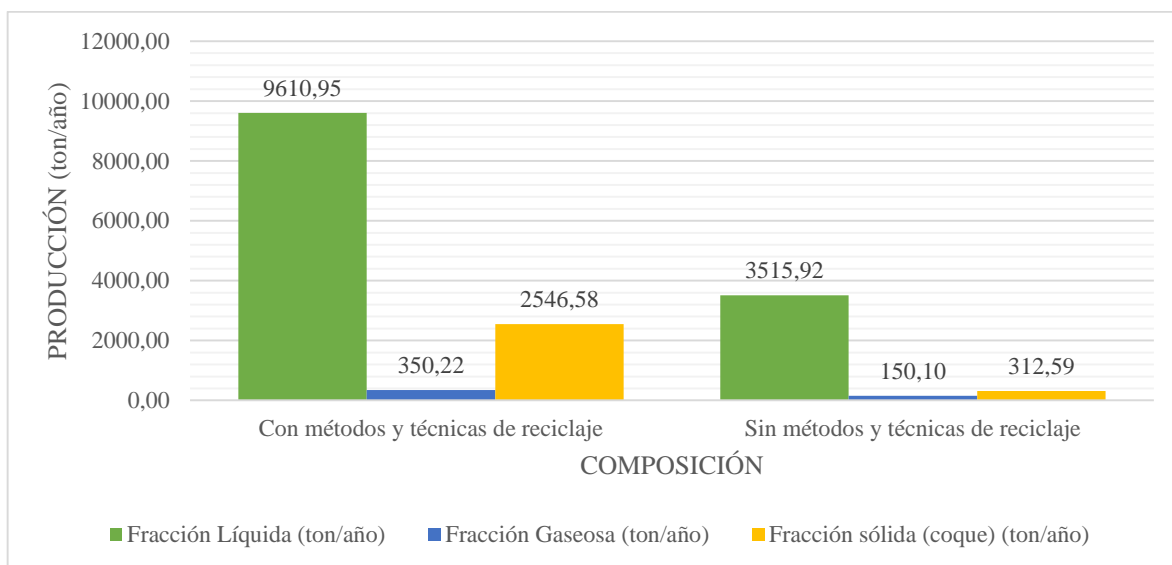
La comparativa de la obtención de productos pirolíticos para el poliestireno con métodos o técnicas de reciclaje representa un 273.38% mayor al no aplicarlas como se muestra a continuación:



**Gráfico 8-4.** Cantidad de fracciones obtenidos como producto de la pirólisis térmica de poliestireno con y sin métodos y técnicas adecuadas de reciclaje.

**Realizado por:** Pinajota Oscar, 2018

La comparativa de la obtención de productos pirolíticos para el polipropileno con métodos o técnicas de reciclaje representa un 273.35% mayor al no aplicarlas como se muestra a continuación:



**Gráfico 9-4.** Cantidad de fracciones obtenidas como producto de la pirólisis térmica de polipropileno con y sin métodos y técnicas adecuadas de reciclaje.

**Realizado por:** Pinajota Oscar, 2018

Estos gráficos demuestran la importancia de aplicar métodos y técnicas adecuadas para la selección y recolección de polipropileno y poliestireno si se desea obtener el rendimiento máximo de sus productos en un proceso de pirólisis térmica.

#### 4.1.6. Esquema de la influencia del uso de catalizador.

Investigaciones realizadas por (Mesa y Ortiz, 2016) determinaron que el uso de catalizadores influye de manera relativamente baja por lo que no se obtiene un gran volumen de productos frente al uso de temperatura.

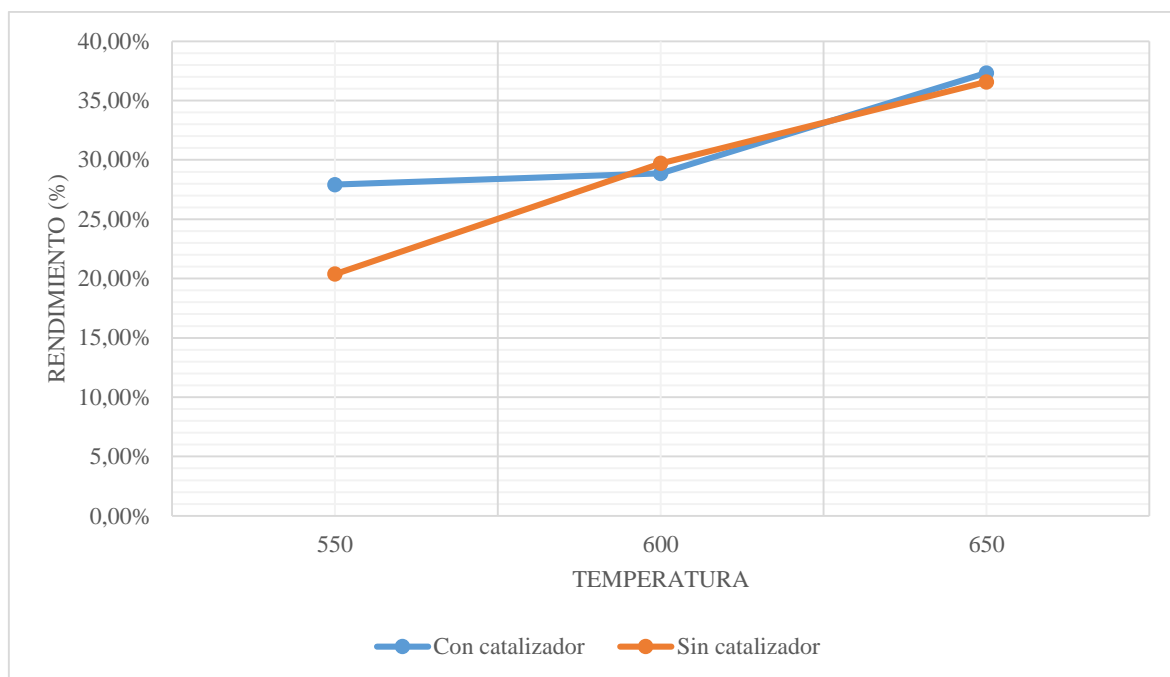
**Tabla 9-4.** Rendimiento de aceite pirolítico a 550°C, 600°C y 650 °C con y sin uso de catalizador

Temperatura (°C)	Con catalizador	Sin catalizador
550	27.91	20.38
600	28.86	29.71
650	37.33	36.57

**Fuente:** (Mesa y Ortiz, 2016). Rendimiento de aceite pirolítico promedio

**Realizado:** Oscar Pinajota, 2018

Por lo tanto, la relación que existe entre la temperatura, el rendimiento de los productos generados no se ve influenciada mayormente por la presencia de catalizador puesto que a 650°C que es la temperatura de mayor generación de compuestos la diferencia de uso de catalizador es de 0.76%, valor despreciable relativamente, de tal forma que se puede descartar su uso y reducir costos de operación.



**Gráfico 10-4.** Relación entre el rendimiento de los productos generados y la temperatura frente a la existencia de catalizador.

Realizado por: (Mesa y Ortiz, 2016)

## 4.2. Prueba de Hipótesis

### 4.2.1. Hipótesis 1

- *Permitirá la ingeniería conceptual de pirólisis térmica de polipropileno y poliestireno la obtención de información de nuevos métodos de tratamiento de desechos plásticos junto con las condiciones de operación más adecuadas y eficientes.*

La finalidad del diseño de una ingeniería conceptual para el proceso de pirólisis térmica de residuos plástico, es el análisis de la viabilidad técnica y operacional de las variables independientes además del rendimiento de los productos finales, los estudios realizados de pirólisis térmica donde factores

como temperatura, tipo de reactor, tiempo de residencia y tipo de materia utilizada influyen positiva o negativamente a los rendimientos finales de productos valiosos como biocombustibles, gases y de menor valor fracciones solidas como coque.

Con el análisis de todas estas variables permitirá la selección de los mejores rangos y eficiencias para una futura implementación del proceso de pirólisis térmica como una alternativa para el manejo de los residuos plásticos, que en la actualidad es un problema ambiental a nivel mundial, como se ha demostrado en los estudios realizados por Aracil (2008), Mastral (2002), mencionan que la pirólisis de polímeros es el método de reciclaje más eficiente en comparación con otros métodos de reciclaje de plásticos.

**Tabla 10-4.** Ventajas y desventajas de los procesos de reciclaje.

<b>Reciclado</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Inconvenientes</b>
<b>Mecánico</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Procesos e instalaciones sencillas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Necesidad de separación de los diferentes polímeros</li> <li>• Solo se aplica a plásticos termoestables</li> <li>• El material resultante es de menos calidad al original</li> <li>• Poca demanda en el mercado</li> </ul>
<b>Recuperación de Energía</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Obtención de energía</li> <li>• Instalación de la planta cerca de las ciudades</li> <li>• Bajo costo de tratamiento de los polímeros</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gran inversión inicial</li> <li>• Necesidad de depuración de gases</li> <li>• Costo de mantenimiento elevado</li> <li>• Generación de gran cantidad de cenizas</li> </ul>
<b>Termoquímico</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No necesita separación de los residuos plásticos</li> <li>• Generación de productos útiles</li> <li>• Aprovechamiento de energía</li> <li>• Reducción de contaminantes plásticos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Necesidad de altas temperaturas</li> <li>• Formación de dioxinas y furanos</li> <li>• Instalación y mantenimiento elevado</li> </ul>

**Realizado por:** Pinajota Oscar, 2018

En cuanto se refiere a las tecnologías empleadas en los tratamientos termoquímicos los más destacados y de mayor uso son la incineración, la pirolisis y la gasificación, a continuación, se muestra las ventajas y desventajas de los mismos.

**Tabla 11-4.** Ventajas y desventajas de los procesos de reciclaje.

Tratamientos termoquímicos	Ventajas	Inconvenientes
<b>Incineración</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Disminución del volumen de residuos en rellenos sanitarios.</li> <li>Utilización del poder calorífico para procesos de calefacción</li> <li>Proceso seguro y de bajo nivel riesgo con el control adecuado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Altos coste de instalación inicial</li> <li>Control de gases generados</li> <li>Requiere de personal calificado por su complejidad</li> <li>Generación de gases tóxicos (furanos, dioxinas) y solidos suspendidos (hollín)</li> <li>El proceso requiere de análisis previos del residuos para el uso adecuado de energí.</li> </ul>
<b>Degradación pirolítica</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Generación de productos derivados del petróleo.</li> <li>A condiciones controladas se puede obtener compuestos específicos.</li> <li>Facilidad en la manipulación de productos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gran inversión inicial</li> <li>Estricto control de las variables de operación para evitar la generación de productos indeseados</li> <li>El proceso requiere de análisis previos del residuos para el uso adecuado de energí.</li> <li>Para alcanzar altos niveles de rendimiento se requiere de tratamientos de reciclaje previos.</li> </ul>
<b>Gasificación</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Generación mayoritaria de gas de síntesis usado en procesos se refinación y formación de nuevos compuestos.</li> <li>Fácil operacionalidad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Requiere de instalaciones complejas con grandes espacios.</li> <li>Elevado consto de mantenimiento</li> <li>Mano de obra calificada especializada</li> <li>Control de gases generados</li> <li>Requiere de altas cantidades de energí para obtener elevados rendimientos.</li> </ul>

**Realizado por:** Pinajota Oscar, 2018

El método más adecuado con mayor número de ventajas y altos rendimientos experimentales obtenidos de la recopilación bibliográfica es el método químico de pirólisis térmica empleado en la degradación de polipropileno y poliestireno, que son los plásticos más utilizados en el Ecuador y con bajo grado de descomposición.



#### 4.2.2. Hipótesis 2

- *Al construir matrices comparativas entre todas las tecnologías existentes se conseguirá establecer la más eficiente y rentable para la pirólisis térmica de polipropileno y poliestireno.*

Después del análisis realizado a las tecnologías existentes y con mayor profundidad a las variables que gobiernan el proceso de la pirólisis térmica de residuos plásticos especialmente poliestireno y polipropileno, estos dos polímeros dan mayores rendimientos de fracciones líquidas (compuestos de mayor valor agregado), el menor es el tiempo de residencia fue de 5 horas a temperatura de degradación (600°C), el rendimiento de los biocombustibles líquidos son más valiosos debido a que las materias primas más importantes del proceso de pirólisis son estas fracciones que contienen keroseno, gasoil y aceites pesados.

Además de estos polímeros tienen una temperatura de degradación menor en comparación a otros plásticos reciclables como: polietileno de alta densidad PEAD, polietileno de baja densidad PEBD, tereftalato de polietileno PET, lo que representa gastos excesivos de energía, encareciendo el proceso final de pirólisis térmica y volviéndolo ineficiente.

Varias investigaciones apuntan a que el mejor equipo para la pirólisis térmica de polipropileno y poliestireno es el reactor Batch de tanque agitado. Un reactor tipo batch es un equipo en el cual se produce una reacción química en cuyo seno el material plástico a descomponer se encuentra en pleno contacto unas con otros y ende la transferencia de calor se puede controlar de forma adecuada mediante un proceso simple de agitación así se asegura la mayor descomposición pirolítica.

Su rendimiento en varias experimentaciones fue del 78% general con fracciones de Líquidas 76.19%, Gases 4.3% y Coque 19.512% frente al 87% para el reactor de lecho fijo y el equipo de destilación fraccionada, la razón por la que se determina este equipo es su mayor eficiencia y rentabilidad radica en su operación y mantenimiento puesto que para reactores como el lecho fijo o fluidizado el control de temperatura se vuelve complejo a grandes escalas por la poca transferencia de masa entre las partículas.

En el caso del equipo de destilación fraccionada que ofrece los más altos porcentajes de obtención de productos, se requiere de una instalación tipo refinería para tratar los residuos a gran escala lo

que representa un costo de inversión exorbitante es por ello que para reducción de gastos ciertas refinerías tratan los residuos previamente y los alimentan en el proceso. De esta forma se recomienda el uso de reactores tipo batch de tanque agitado.

#### 4.2.3. Hipótesis 3

- *Con la revisión bibliográfica de la pirólisis térmica de polipropileno y poliestireno se evalúa su rendimiento en la obtención de biocombustibles con otros materiales plásticos.*

La utilización de poliestireno y polipropileno son los polímeros que mayores fracciones líquidas se obtienen debido a que estos cuando se degradan forman moléculas de eteno y propeno que son compuestos inestables a altas temperaturas lo que ocasionan que estas moléculas formen compuestos cíclicos y de igual manera compuestos aromáticos.

En cambio, la degradación térmica de otro tipo de polímeros los rendimientos sólidos y gaseosos depende de la composición de como se muestra, estos datos son el resultado de la investigación documental con los cuales se tiene el punto de partida para seleccionar el mejor residuo para la obtención de productos útiles.

Como menciona (Arce y Suarez, 2017) los compuestos poliolefínicos como el polipropileno, poliestireno y polietileno generan mayor cantidad de hidrocarburos líquidos y gases condensables, teniendo una generación menor en otros residuos plásticos.

**Tabla 12-4.** Rendimiento de diversos polímeros

Pirólisis Térmica		
Polímero	Temperatura °C	Rendimiento
Poliestireno PS	500-800	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Líquidas 68.55%</li> <li>• Gases 18.75%</li> <li>• Coque 12.7%</li> </ul>
Polipropileno PP	450-750	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Líquidas 47.18%</li> <li>• Gases 24.63%</li> <li>• Coque 28.19%</li> </ul>
Tereftalato de polietileno PET	210-370	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Líquidas 2.13%</li> <li>• Gases 87.51%</li> <li>• Coque 10.36%</li> </ul>

Polietileno de baja densidad PEBD	120-136	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Líquidas 47.18%</li> <li>• Gases 24.63%</li> <li>• Coque 28.19%</li> </ul>
Polietileno de alta densidad PEAD	450	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Líquidas 18.84%</li> <li>• Gases 41.25%</li> <li>• Coque 6.53%</li> </ul>

**Realizado por:** Pinajota Oscar, 2018

De forma general los residuos plásticos pueden generar fracciones líquidas, gaseosas y sólidas en la pirólisis térmica de la siguiente manera:

**Tabla 13-4.** Rendimiento de fracciones en el proceso de pirólisis térmica

Polímero	Rendimiento		
	Líquidas	Gaseosas	Sólidas
Poliestireno	Alto	Bajo	Bajo
Polipropileno	Alto	Bajo	Bajo
Polietileno de alta densidad	Bajo	Alto	Alto
Polietileno de baja densidad	Bajo	Alto	Alto
Tereftalato de polietileno	Bajo	Alto	Alto

**Realizado por:** Pinajota Oscar, 2018

#### 4.2.4. Hipótesis 4

- *Al analizar las tecnologías existentes se establecerá las mejores condiciones de operacionalidad de la pirólisis térmica de polipropileno y poliestireno, así como su costo de implementación.*

Para el desarrollo de una ingeniería conceptual para el proceso de pirólisis térmica de poliestireno y polipropileno se analizaron todas las variables operacionales que rigen el proceso de degradación de polímeros y el costo económico para una futura implementación o desarrollo de una ingeniería básica o implementación a nivel industrial, además en el análisis de las revisiones bibliográficas se detalla el costo económico de implementación a escala de laboratorio.

En las bibliografías analizadas todos los autores coinciden que las variables como temperatura, tipo de reactor utilizado, tiempo de retención del polímero, y materia prima utilizados son los factores

que influyen en la obtención de materias primas valiosas, se determinó según la recopilación bibliográfica que los mejores parámetros para la pirólisis térmica de polipropileno y poliestireno utilizando métodos y técnicas de reciclaje son:

**Tabla 14-4.** Parámetros teóricos para el proceso de pirólisis térmica de polipropileno con tratamientos adecuados de reciclaje.

PARÁMETRO	INDICADOR
Temperatura	450-750 °C
Presión	Atmosférica
Velocidad de calefacción	Mayor a 1000 K/s
Tiempo de residencia	2 horas
Composición de la materia prima	Residuos de polipropileno previo tratamiento de reciclaje
Tipo de reactor	Reactor tipo Batch
Fracciones obtenidas	Líquidas 47.18% Gases 24.63% Coque 28.19%

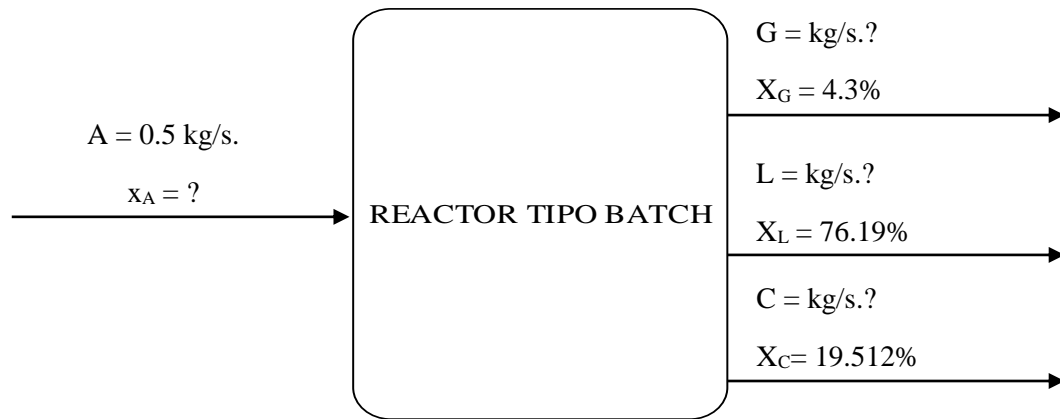
Realizado por: Pinajota Oscar, 2018

**Tabla 15-4.** Parámetros teóricos para el proceso de pirólisis térmica de poliestireno con tratamientos adecuados de reciclaje.

PARÁMETRO	INDICADOR
Temperatura	500-800 °C
Presión	Atmosférica
Velocidad de calefacción	Mayor a 1000 K/s
Tiempo de residencia	4 horas
Composición de la materia prima	Residuos de poliestireno previo tratamiento de reciclaje
Tipo de reactor	Reactor tipo Batch
Fracciones obtenidas	Líquidas 68.55% Gases 18.75% Coque 12.7%

Realizado por: Pinajota Oscar, 2018

#### 4.2.4.1. Balance de masa



**Esquema 1-4.** Balance de masa global para los polímeros (PS y PP)

**Realizado por:** Oscar Pinajota, 2018

Donde;

A = Alimentación de PS y PP en kg/s.

G = Gases generados en kg/s.

L = Líquido obtenido en kg/s.

C = Coque obtenido en kg/s.

##### 1. Balance de masa global

$$A = G + L + C$$

$$0.5 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = G + L + C$$

Por consiguiente, se calcula los valores de flujos máscicos de salida con respecto a las concentraciones de cada elemento.

$$Ax_A = Gx_G + Lx_L + Cx_C$$

Donde;

$x_A$ ,  $x_G$ ,  $x_L$  y  $x_C$  son las concentraciones parciales de cada elemento. Para el cálculo de los flujos máscicos se utiliza la siguiente fórmula:

$$x_j = \frac{j}{A}$$

Donde, j representa a los flujos másicos de salida. Por ende, se procede al cálculo de las de los flujos másicos:

$$x_G = \frac{G}{0.5 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}$$

$$0.043 = \frac{G}{0.5 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}$$

$$G = 0.0215 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Para los siguientes cálculos, se procede de la forma anterior para determinar los flujos másicos L y C. Por ende, para el cálculo de  $x_A$ , se parte del siguiente balance:

## 2. Balance de masa global con fracciones

$$Ax_A = Gx_G + Lx_L + Cx_C$$

$$\left(0.5 \frac{\text{kg}}{\text{s}}\right) * x_A = \left(0.0215 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 0.043\right) + \left(0.38095 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 0.7619\right) + \left(0.09756 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 0.19512\right)$$

$$x_A = 0.6204$$

En la tabla 16-4 se detallan los flujos másicos con sus respectivas concentraciones parciales de cada elemento.

**Tabla 16-4.** Datos del balance de masa global para los polímeros (PS y PP)

Ítem	Descripción	Unidades	Resultado
1	A	$\frac{\text{kg}}{\text{s}}$	0.5
2	G	$\frac{\text{kg}}{\text{s}}$	0.0215
3	L	$\frac{\text{kg}}{\text{s}}$	0.38095
4	C	$\frac{\text{kg}}{\text{s}}$	0.09756

5	$x_A$	-	0.6204
6	$x_G$	-	0.043
7	$x_L$	-	0.7619
8	$x_C$	-	0.19512

**Realizado por:** Oscar Pinajota, 2018

Los parámetros para la pirolisis térmica de polipropileno y poliestireno sin el uso de métodos y técnicas de reciclaje, es decir con la presencia de contaminantes ajustado a la realidad de los residuos plástico se tiene:

**Tabla 17-4.** Parámetros teóricos para el proceso de pirólisis térmica de poliestireno sin tratamientos adecuados de reciclaje.

PARÁMETRO	INDICADOR		
Temperatura	600 °C		
Presión	Atmosférica		
Velocidad de calefacción	Mayor a 1000 K/s		
Tiempo de residencia	5 horas		
Composición de la materia prima	Mezcla de polipropileno y poliestireno contaminado		
Tipo de reactor	Reactor tipo Batch		
Contenido de agua	Inferior al 20%		
Tamaño de partícula	4x3 cm		
Peso de la muestra	0.5 Kg		
Fracciones obtenidas	Poliestireno	Líquidas	25.075%
		Gases	7.985%
		Coque	1.56%
	Polipropileno	Líquidas	28.11%
		Gases	1.20%
		Coque	2.50%

**Realizado por:** Pinajota Oscar, 2018

El costo de implementación de un equipo con estas características según Jinzhen Machinery Manufacturing Co., Ltd. ronda los 5680 USD, las características y cotización se muestran en el Anexo G, siempre que se lo utilice para fines experimentales o de laboratorio, en el caso de un proceso a escala industrial se debe diseñar el equipo y las instalaciones acorde a las necesidades.

### 4.3. Discusión de Resultados

Analizado todas las variables de diseño se escogió los mejores parámetros que beneficia al desarrollo de una ingeniería básica (diseño y construcción del equipo de pirolisis), siendo la ingeniería conceptual el primer paso de investigación teórico de los parámetros operacionales y viabilidad de los proyectos, en el caso de pirólisis térmica las variables son:

- La temperatura de degradación dependerá según (Mesa y Ortiz, 2016), del polímero utilizado porque cada plástico tiene su propia temperatura de degradación, cuando se piroliza poliestireno y polipropileno el rango ideal fluctúa entre 500-750°C, ya que a mayores temperaturas la deposición de coque en el reactor aumenta (producto no deseado), así también combustible ligeros y gases, siempre y cuando se realice tratamientos o técnicas de reciclaje de residuos.

En la realidad de nuestro país se presenta mezclas de polipropileno, poliestireno, contaminantes y otros residuos plásticos los cuales no han sido tratados previamente, para ellos se requiere de una temperatura de 600°C y un tiempo de 5 horas para efectuar un rendimiento considerable teóricamente valor que se encuentra influenciado por la presencia de humedad, tamaño de partícula, tipo de reacción pirólítica.

- Según (Mohammad y Moinuddin, 2013) y (Mancheno, 2015), los parámetros ideales para la pirólisis térmica de polipropileno y poliestireno en cuanto al tiempo de retención resulta en una pirólisis flash o pirólisis rápida (tiempo de retención de segundos a minutos) en el cual los rendimientos líquidos son mayores y las fracciones sólidas disminuyen, no es recomendable utilizar tiempos muy cortos ya que la degradación del polímero aumenta con el tiempo de residencia del material, con un tiempo de retención del material de 20 a 30 minutos siendo los tiempos más óptimos para plásticos previamente tratados y 5 horas para aquellos sin tratamiento previo según (Mesa y Ortiz, 2016).
- Mientras menor es el tamaño de partícula del polímero mayor será la superficie de transferencia de calor, mejorando el tiempo de reacción y la temperatura de operación del reactor, además la eficiencia de los productos obtenidos aumenta. Los estudios realizados confirman que las dimensiones adecuadas son de 4x3 cm para estos dos polímeros según (Mesa y Ortiz, 2016).



- En cuanto se refiere al equipo, según (Mancheno, 2015) (Proaño O y Crespo S, 2009), el reactor tipo Batch de tanque agitado presenta un rendimiento general del 78% con fracciones de Líquidas 76.19%, Gases 4.3% y Coque 19.512% frente al 87% para el reactor de lecho fijo y el equipo de destilación fraccionada, la razón por la que se determina este equipo es su mayor eficiencia y rentabilidad radica en su operación y mantenimiento, puesto que para reactores como el lecho fijo o fluidizado el control de temperatura se vuelve complejo a grandes escalas por la poca transferencia de masa entre las partículas.
- En el caso del equipo de destilación fraccionada que ofrece los más altos porcentajes de obtención de productos, se requiere de una instalación tipo refinería para tratar los residuos a gran escala lo que representa un costo de inversión exorbitante es por ello que para reducción de gastos ciertas refinerías tratan los residuos previamente y los alimentan en el proceso
- Según (Westerhout, y otros, 1997b).El tipo de materia prima utilizada depende directamente al producto generado por tal razón es indispensable un correcto tratamiento para la obtención de elevados rendimientos, en caso de no ser posible un tratamiento completo, una selección de polipropileno y poliestireno sencilla permitirá obtener sus fracciones junto con la de diversos polímeros en dependencia de su composición. Es ideal tomar en consideración las condiciones reales de los residuos plásticos pues junto con ellos existe humedad y contaminantes que afectan al proceso.

Analizado todas estas variables con el fin de seleccionar un diseño que sea técnicamente viable sin recaer en un alto costo de operación, mantenimiento, facilidad operacional y mejores rendimientos de productos, hay muchos procesos que presentan altos rendimientos de fracciones líquidas y gaseosas que son las de mayor importancia por su utilización como combustibles alternos y gases de calefacción siendo estos las materias primas más valiosas en la degradación de polímeros. Las fracciones líquidas son las materias más valiosas ya que se pueden utilizar como combustibles alternos, debido a que en la actualidad los altos costos de los combustibles tradicionales se encarecen diariamente y obtener este tipo de combustibles de materiales de desecho es una buena alternativa, además de tratar adecuadamente estos residuos y evitar así problemas ambientales.

Analizado todas estas variables se presenta en la siguiente tabla las mejores condiciones para la pirólisis térmica de poliestireno y polipropileno.

**Tabla 18-4.** Matriz comparativa, selección de los rangos óptimos para el proceso de pirólisis térmica de polipropileno y poliestireno con la aplicación de técnicas de reciclado.

Polímero	Temperatura	Tiempo de Residencia	Tipo de Reactor	Tamaño del polímero	Porcentaje de Degradación del Polímero	Rendimientos
Poliestireno	500-800°C	20-30 minutos	Reactor tipo batch	<180 mm	87%	Líquidas 68.55% Gases 18.75% Coque 12.7%
Polipropileno	450-750°C	20-30 minutos	Reactor tipo batch	<180 mm	87%	Líquidas 47.18% Gases 24.63% Coque 28.19%

Realizado por: Pinajota Oscar, 2018

**Tabla 19-4.** Matriz comparativa, selección de los rangos óptimos para el proceso de pirólisis térmica de polipropileno y poliestireno sin la aplicación de técnicas de reciclado.

Polímero	Temperatura	Tiempo de Residencia	Tipo de Reactor	Tamaño del polímero	Porcentaje de Degradación del Polímero	Rendimientos
Poliestireno	650°C	5 horas	Reactor tipo batch	4x3 cm	87%	Líquidas 25.075% Gases 7.985% Coque 1.56%
Polipropileno						Líquidas 28.11% Gases 1.20 % Coque 2.50%

Realizado por: Pinajota Oscar, 2018

## CONCLUSIONES

- Se analizó las tecnologías existentes del proceso de pirólisis obteniendo los mejores rendimientos de fracciones líquidas 68.55% para el poliestireno y 47.18% de polipropileno en un tiempo de retención del material menor a 30 minutos con una eficiencia del proceso pirolítico del 87% siempre que se realice tratamientos previos de reciclado, por otra parte al no realizar dichos tratamientos la composición de líquidos es de 25.07% y 28.11% respectivamente por la presencia de contaminantes y otros polímeros.
- En cuanto se refiere al equipo, el reactor tipo Batch de tanque agitado presenta un rendimiento general del 78% con fracciones de Líquidas 76.19%, Gases 4.3% y Coque 19.512%.
- Los procesos con previo tratamiento de reciclaje su temperatura de degradación varía de entre 500 – 800°C para el poliestireno y 450 – 750°C para el polipropileno, el tipo de reactor que presenta las mayores ventajas es el reactor tipo batch de tanque agitado con un rendimiento del 87% , el tiempo de retención para el proceso fue menor a los 30 minutos.
- Las variables obtenidas para la pirólisis térmica sin la utilización de métodos de reciclaje fue de 650°C para la temperatura de degradación, en un tiempo de residencia de 5 horas para una mezcla de polímeros entre los que se encuentran polipropileno, poliestireno, contaminantes, otros plásticos cuya eficiencia fue del 87% en un reactor de tipo batch obteniendo como productos las siguientes fracciones: Para el poliestireno (Líquidas 25.075%, Gases 7.985%, Sólidos 1.56%) y para el polipropileno (Líquidas 28.11%, Gases 1.20 %, Coque 2.50%), sobre una muestra de 0.5Kg y un tamaño de partícula inferior a los 4x3 centímetros.

## RECOMENDACIONES

- Antes de la realización de cualquier equipo o proceso es recomendable realizar la ingeniería conceptual donde se analizan las variables técnicas, operacionales y económicos para conocer la viabilidad técnica y rentabilidad, realizado este estudio como segundo paso es la ingeniería básica que es el diseño y construcción de los equipos o procesos.
- Es necesario tener en consideración todos los factores que influyen en un proceso para llevarlos de una prueba piloto a escala industrial, pues por más insignificante que sea una variable influirá drásticamente en la obtención de los productos deseados.
- La pirólisis térmica se puede utilizar en todo el campo de recuperación de compuestos poliméricos plásticos pues es un método muy eficiente de alto rendimiento que requiere del control de las variables de operación independientes para obtener el producto deseado.
- La pirolisis es la técnica de reciclado químico de mayor generación y aprovechamiento energético por lo tanto se debe aplicar al campo de la manipulación final de residuos sólidos urbanos e industriales para aprovechar al máximo estos desechos y reducir tanto la contaminación ambiental como la explotación de fuentes naturales de las cuales se extrae la materia prima para su fabricación.

## BIBLIOGRAFÍA

**Achillas, D, Giannoulis, A y Papagergiou, G.** Recycling of polymers from plastic packaging materials using the dissolution - reprecipitation technique. s.l. : Polymer Bulletin, vol. 63,, 2009, pp. 445-449.

**Aguado et. al.** Performance of a continuous screw kiln reactor for the thermal and catalytic conversion of polyethylene lubricating oil base mixtures. *Applied Catalysis B: Environmental*. España : s.n., 2003, pp. 95-105.

**AL Salem S.M.** *A review on thermal and catalytic pyrolysis of plastic solid waste*. 2017. p. 1.

**Aldea et al.** Kinetic study for the thermal decomposition of cellulose and pine sawdust in an air atmosphere: Anal. Appl. Pyrol., 1997, pp. 53-54.

**APME.** An analysis of plastics consumption and recovery in Europe. Association of plastics Manufactures in Europe. España : s.n., 2002.

**Aracil I.** Formación de Contaminantes y Estudio Cinético de la Pirólisis y Combustión de Plásticos (PE, PPVC y PCP). Aracil I. *Tesis Doctoral*. Alicante : s.n., 2008, pp. 2.

**Arandes, et. al.** Valorization by thermal cracking over silica of polyolefins dissolved in LCO. M Arandes, y otros. *Fuel Processing and Technology*. España : s.n., 1999, Vol. 54, pp. 3034-3051.

**Arce y Suarez.** Obtención y caracterización de combustible a partir de desechos termoplásticos PEBD( Low density polyethylene) recolectados en la Universidad de Guayaquil. Juan Arce y Shirley Suarez. Guayaquil : s.n., 2017.

**Balat, H; et al.** Main routes for the thermo-conversion of biomass into fuels and chemicals. M., Kirtay, E., Balat, H. Balat. *Main routes for the thermo-conversion of biomass into fuels and chemicals*. s.l. : Energy Conversion, 2009, pp. 3147-3157.

**Berenguer, Deseada.** Craqueo catalítico de polímeros; estudio de diferentes sistemas polímero/catalizador. Deseada Berenguer Muñoz. Alicante : Universidad de Alicante, 2008, pp. 44-49.

**Bilesheuevel et al.** A novel interconnected fluidised bed for the combined flash pyrolysis of biomass and combustion of char. P Bilesheuevel, y otros. *Chemical Engineering Journal*. The Netherland : s.n., 2000, Vol. 76, pp. 76-86.

**Billy, V.** Reciclaje de Platicos. [En línea] 2011.  
<http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/5136/1/T207.pdf>.

**Bittner, et.al.** "Hydrogenation". Low temperature pyrolysis for feedstock preparation. Properties and uses of recycled, expanded polystyrene. M Bittner, y otros. *Recycling and Recovery of Plastics*. Munich : s.n., 1999.

**Bockhorn et al.** Kinect study on the thermal degradation of polypropylene and polyethylene. H Bockhorn, y otros. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. Karlsruhe : s.n., 1999, Vol. 48, pp. 93-109.

**Bockhorn, et. al.** Environmental engineering: stepwise pyrrolysis of plastic waste. H Bockhorn, J Henschel y U Hornurg. *Chenical Engineering Science*. Karlsruhe : s.n., 1999, Vol. 54, pp. 3043-3051.

**Castrillón, O; Puerta, S.** Impacto del manejo integral de los residuos sólidos en la Corporación Universitaria Lasallista. Corporación Universitaria Lasallista. *Revista Lasallista de Investigación*. Colombia : s.n., 2002, Vol. 1.

**Cheon y Lee.** Kinetics of the thermal degradation of wax materials obtained from pyrolysis of mixed waste plastics. O Cheon y K Lee. s.l. : Cheonan, 2009.

**Ciocâlțeu, et. al.** Thermal and Catalytic decomposition of mixed plastics. S Ciocâlțeu, y otros. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. Romania : s.n., 2001, Vol. 57, pp. 287-303.

**CONESA.** Estudio de la Pirólisis de Residuos Plásticos del Polietileno y Neumáticos Usados. 1996.

**Country Meters.** Poblacion del Ecuador. [En línea] 10 de 04 de 2018. [Citado el: 15 de 05 de 2018.] <http://countrymeters.info/es/Ecuador>.

**Coyago E et. al.** Recomendaciones para la caracterización y cuantificación de residuos sólidos universitarios. Caso de estudio: Universidad Politécnica Salesiana, Campus Sur, Quito. Elena Coyago, y otros. *Revista de Ciencias de la Vida* 23. Quito : s.n., 2016.

**Cozzani V et. al.** Influence of gas-phase reactions on the product yields obtained in the pyrolysis of polyethylene. Nicoletta C, Rovatti M y Tognotti L Cozzani V. 1997, pp. 342-348.

**Czernik et al.** Fast pyrolysis of plastic wastes. S Czernik, y otros. s.l. : Energy Fuel, 1990, pp. 407-411.

**De Cusa, Juan.** Aplicaciones del plástico en la construcción. Barcelona : CEAC, 1979.

**Dirks, E. 1996.** Recovery from Plastic Waste in Waste Incineration Plants, first ed. s.l. : Verlag Publish, 1996, pp. 746-769.

**Ebeling, F, Huberth, H y Schlor, N.** Ciencia de los Plásticos. s.l. : Costa Nogal, 2002.

**ECOPLAST.** ECOPLAST. [En línea] 18 de 05 de 2011. [Citado el: 20 de 11 de 2017.] <http://ecoplas.org.ar/pdf/38.pdf>.

**Edwin G. et al.** Mecanismos de degradación térmica y catalítica de poliestireno bajo condiciones de hidrocrackeo. María P. González-Marcos Edwin G. Fuentes. Bilbao : Ciencias e Ingeniería, 2011, pp. 7-14.

**EMGIRS-EP.** Empresa Pública Metropolitana de Gestión Integral de Residuos Sólidos EMGIRS - EP. [En línea] 10 de 2013. [Citado el: 15 de 05 de 2018.] <https://www.emgirs.gob.ec/index.php/zenkit/visitas-al-relleno-sanitario-2>.

**Espinoza E.** *Modelo de Gestión de Residuos Plásticos*. Argentina : Mensoza, 2009. p. 2.

**Fernández, Almudena.** Análisis de la estructura, movilidad molecular y propiedades de copolímeros de impacto de polipropileno. Modelo de Estructura de Fases. Móstoles : s.n., 2014.

**Font y Conesa.** Reactores Heterogéneos. A Conesa y R Font. *Universidad de Alicante*. Alicante : s.n., 2002.

**Fred, Billmeyer.** Otros Polímeros. Billmeyer Jr Fred W. *Ciencia de los Polímeros*. España : Reverté, 2004.

**Frers C.** *Los problemas de la basura y una posible solución*. s.l. : El Cid Editorial, 2009. Apunte 7.

**Frias A, et. al.** La Situación de los envases Plásticos en México. Arturo Frías, Arturo Garcia y Irina Lema. *Gaceta Ecológica*. México : Redalyc, 2003.

**Gallardo , Pedro.** Aspectos técnicos, teóricos y fundamentos del policloruro de vinilo (PVC) como soporte artístico e industrial. Pedro Pablo Gallardo. Córdoba : s.n., 1997.

**García, Sergio.** Referencias Históricas y Evolución de los Plásticos. *Revista Iberoamericana de Polímeros*. Valencia : s.n., 2008.

**GIZMODO.** GIZMODO. [En línea] 2018. [Citado el: 03 de 04 de 2018.] <https://es.gizmodo.com/que-significan-realmente-los-numeros-grabados-en-la-par-1793164289>.

**Gonzáles, Francisco.** Caracterización de Mezclas de Residuos de Poliestireno Expandido (EPS) conglomerados con yeso o escayola, su uso en la construcción. Francisco Javier Gonzáles Madariaga. Barcelona : Universidad Politécnica de Catalunya, 2005.

**Groover, Mikell.** Polipropileno. *Fundamentos de Manufactura Moderna*. México : RAEI Maes, 1997.

**Guajardo, A et al.** Propiedades de los plasticos reciclados. Mendoza : Universitaria, 2017, pp. 3-4.



**Hall, W. et al.** The co-pyrolysis of flame retarded high impact polystyrene and polyolefins. W.J., Mitan, N.M.M., Bhaskar, T., Muto, A., Sakata, Y., Williams, P.T Hall. s.l. : ELSEIVER, 2007, pp. 406-415.

**Hernández, María. .** Los Plásticos en los residuos sólidos Urbanos. Remedio Hernández Férez. *Evaluación de la Pirólisis Térmica y Catalítica de Polietileno en Lecho Fluidizado como Técnica de Reciclado. Infleuncia de las Variables sobre los Productos Generados.* Alicante : Universidad de Alicante, 2007, pp. 27-30.

**INEC.** *Información Ambiental en Hogares.* 2016. pp. 3-7.

**Jumarsol.** El proceso de degradacion del Plástico. [En línea] 29 de 04 de 2016. [Citado el: 15 de 05 de 2018.] <http://blogjumarsol.es/proceso-degradacion-los-plasticos/>.

**Kaminsky y Schmidt.** Pyrolysis of oil sludge in a fluidised bed reactor. H Schmidt y W Kaminsky . *Chemosphere.* Hamburg : s.n., 2001, Vol. 45, pp. 285-290.

**Karaduman A. et al.** Flash pyrolysis of polystyrene wastes in a free-fall reactor under vacuum. 2001, pp. 179-186.

**Kuipers et al.** Experimental determination of the yield of pyrolysis products of polyethylene and polypropylene. J Kuipers, W Van Swaaij y R Westerhout. s.l. : Influence of reaction conditions. *Ind. Eng. Chem*, 1998, pp. 841-847.

**Larrauri; et. al.** Identificación y separación de polímeros y plásticos procedentes de residuos sólidos urbanos para su reciclado. E Larrauri , R Miguel y R Noll. *Residuos Plásticos.* Bilbao : s.n., 1997.

**Layedra, F, Galeas, S y Guerrero , V.** Estudio de la Biodegradación de un Material Compuesto Obtenido con Ácido Poliláctico (PLA) Reforzado con Fibra Corta de Abacá (Musatextilis) . s.l. : Revista Politécnica, 2015, pp. 126-136.

**Ludlow-Palafox et al.** Microwave-induced pyrolysis of plastic waste. C., Chase, H.A., Ludlow-Palafox. England : Revista Indecxada, 2001, pp. 4749-4756.

**Mancheno, et. al.** Aprovechamiento Energético de Residuos Plásticos Obteniendo Combustibles Líquidos, Por Medio de Pirólisis. Myrian Mancheno, y otros. Cuenca : s.n., 2015, p. 2.

**Marcilla A. et al.** Caracterización de poliestireno de alto impacto por pirólisis catalítica sobre Al-MCM-41: Estudio de la influencia del contacto entre el polímero y el catalizador. A. Gómez-Siurana, JC García A. Marcilla. Alicante : ScienceDirect, 2007, pp. 1867-1880.

**Martínez G.** Polímeros. [En línea] Universidad Nacional Autónoma de México, 18 de 04 de 1983. [Citado el: 10 de 03 de 2018.] <http://www.revistaciencias.unam.mx/pt/139-revistas/revista-ciencias-4/1083-pol%C3%ADmeros.html>.

**Masanet A. et al.** An assessment and prioritization of “design for recycling” guidelines for plastic components. San Francisco : Proc: Electronics and the Environment, IEEE International Symposium, 2002.

**Mastral F. et al.** Pyrolysis of high-density polyethylene in a fluidised bed reactor: influence of the temperature and residence time. F.J., Esperanza, E., García, P., Juste, M. Mastral. s.l. : Appl Pyrol, 2002, pp. 1-15.

**McCaffrey, W. et al.** Thermolysis of polyethylene. W.C., Kamal, M.R., Cooper, D.G. McCaffrey. s.l. : Polym. Deg. Stab, 1995, pp. 133-139.

**Menese J, et. al.** Síntesis y Caracterización de un Polímero Biodegradable a Partir del Almidón de Yuca. Juliana Meneses, María Catalina Corrales y Marco Valencia. *Revista EIA*. Antioquia : Scielo, 2007.

**Mesa y Ortiz.** Evaluación del proceso de pirólisis para la producción de diesel a nivel laboratorio a partir de residuos plásticos de industrias de alimentos. María Mesa y Carol Ortiz. Bogota : s.n., 2016.

**Milgrom, J.** Polyethylene Tereftalato (PET). *Plastics Recycling*. Munich : Ehrin R, 1992.

**Miravete, Antonio.** Los nuevos materiales en la construcción. Zaragoza : Antonio Miravete, 1995.

**Mohammad y Moinuddin.** Polipropileno y poliestireno de residuos plásticos mezcla de Diesel Combustible para motores de camiones / autobuses. Rashid Mamunor Mohammad y Sarker Moinuddin. Stamford : Revista Internacional de Ciencias de la Ingeniería invención ISSN, 2013, pp. 62-69.

**Molina, J.** Los materiales básicos de la construcción. Sevilla : Progenza, 1995.

**Mordi, R, Dwyer, J. y Fields, R.** Polym. Degrad. & Stab. 1991, pp. 37-52.

**Murata et. al.** Effect of pressure in thermal degradation of polyethylene. Sato K y Sakat K Murata K. 2004, pp. 569-589.

**Nayely, Briseila.** Obtención y caracterización de un polímero a partir de la mezcla de polietileno de baja densidad (PEBD) y almidón de maíz modificado. Briseila Nayely . México : s.n., 2010.

**ONU.** Naciones Unidas. *Población*. [En línea] 2016. [Citado el: 20 de 04 de 2018.] <http://www.un.org/es/sections/issues-depth/population/index.html>.

**Onwudilia y Williams.** Catalytic supercritical water gasification of plastics with supported RuO<sub>2</sub>: a potential solution to hydrocarbonsewater pollution problem. Process Safe. J Onwudilia y P Williams. s.l. : Environ. Prot, 2016, pp. 140-149.

**Proaño O y Crespo S.** Obtención de Combustibles a travez de Residuos Plásticos. 2009, pp. 137-144.

**PROPILCO.** [En línea] 27 de 10 de 2017. [https://www.esenttia.co/downloadableFiles/technologyServices/informacionPolipropileno/421\\_Generalidades\\_con\\_Logo.pdf](https://www.esenttia.co/downloadableFiles/technologyServices/informacionPolipropileno/421_Generalidades_con_Logo.pdf).

**Quishpe A.** Programa Nacional para la Gestión Integral de Desechos Sólidos (MAEPNGIDS). *Ficha Informativa de Proyecto 2017*. [En línea] Ministerio del Ambiente Ecuador, 06 de 09 de 2017. [Citado el: 15 de 04 de 2018.] <http://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/09/PNGIDS-AGOSTO-2017.pdf>.

**Recycling, Handbook of Plastics.** Handbook of Plastics Recycling. [En línea] 2018. [Citado el: ]

**Richardson & Lokensgard.** Industria del Plástico. Richardson & Lokensgard. Madrid : Paraninfo, 2002.

**Rivadeneira , L; Zumárraga, M.** Ecuador en Cifras. Liliana Rivadeneira y Magnolia Zumárraga. *Evolución de las variables investigadas en los censos de población y vivienda de Ecuador 1950, 1962, 1974, 1982, 1990, 2001, 2010.* Quito : s.n., 2010.

**Rivera, Jorge.** Polímeros Materiales de Ingeniería. México : s.n., 2010.

**Scheirs J y Kaminski W.** *Feedstock Recycling and Pyrolysis of Waste Plastics: Converting Plastics into Diesel and Other Fuels.* Londres : John Wiley & Sons, 2006.

**Seoáñez, Mariano.** Residuos: problemática, descripción, manejo, aprovechamiento y destrucción. Seoáñez Mariano. Madrid : Mundi-Prensa, 2000.

**Serrano, D.** Reciclado Químico de Plásticos. *Revista de Plásticos Modernos.* Madrid : CSIC, 2001.

**Sing B y Sharma N.** *Mechanistic implications of plastic degradation.* 2008. pp. 561-584.

**Society of the Plastics Industry.** Tabla de códigos de Resina. Society of the Plastics Industry. USA : s.n., 2010.

**SPI.** Guide for Standard Worldwide Terminology for use in recycling of plastics. Inc The Society of Plastics Industry. Valencia : s.n., 1999.

**Steininger y Walendziewski.** Thermal and catalytic conversion of waste polyolefins. M Steininger y J Walendziewski. *Catalysis Today.* Wroclaw : s.n., 2001, Vol. 65, pp. 323-330.

**Steinvorth, Arturo.** Aprovechamiento energético de residuos sólidos municipales mediante el uso de tratamientos térmicos de avanzada. CEGESTI. *Éxito Empresarial.* Costa Rica : s.n., 2014.

**Sukurai K.** Hojas de Divulgación Técnica. [En línea] 10 de 12 de 2000. [Citado el: 15 de 05 de 2018.] <http://www.bvsde.paho.org/eswww/proyecto/repidisc/publica/hdt/hdt017.html>.

**UNEP.** Liquid Fuel Production. United Nations Environment Programme. *Converting Waste Plastics into a Resource: Compendium of Technologies.* Osaka : s.n., 2009, p. 15.

**UNESCO.** Conferencia Intergubernamental sobre Educación Ambiental. Informe final. Colombia : s.n., 1997.

**UPV.** Curso de Fundamentos de Ciencia de Materiales. [En línea] Universidad Politécnica de Valencia, 2017. [Citado el: 28 de 04 de 2018.] [https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm15/fcm15\\_4.html](https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm15/fcm15_4.html).

**Walas, Stanley.** Chemical Reaction. Stanley Walas . *The Engineering of Chemical Reactions*. New York : s.n., 1998.

**Wallis M y Bhatia S.** *Thermal degradation of high density polyethylene in a reactive extruder*. 2007. pp. 1721-1729.

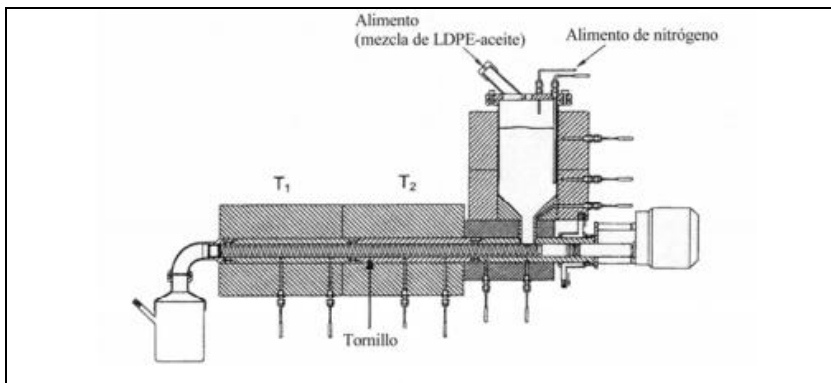
**Westerhout, R, Waanders, J y Kuipers, J.** Kinetics of the low-temperature pyrolysis of polyethene, polypropene, and polystyrene modelling, experimental determination and comparison with literature models and data. s.l. : Ind. Eng. Chem. Res, 1997b, pp. 1955-1964.

**Williams E y Williams P.** Fluidised bed pyrolysis of low density polyethylene to produce petrochemical feedstock. E Williams y P Williams. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. Leeds : s.n., 1999, Vol. 51, pp. 107-126.

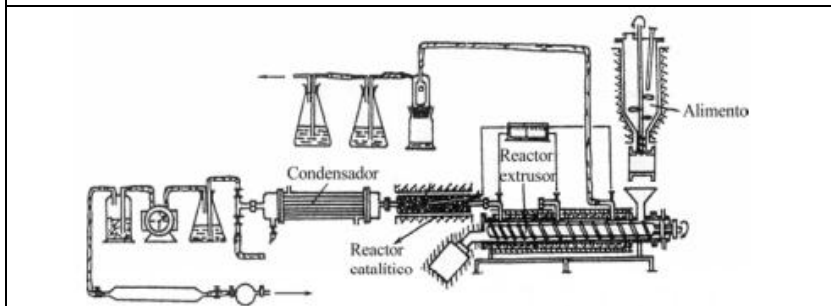
**Y.-H. Lin, M.-H. Yang.** Catalytic conversion of commingled polymer waste into chemicals and fuels over spent FCC commercial catalyst in a fluidised-bed reactor. 2006, pp. 145-153.

## ANEXOS

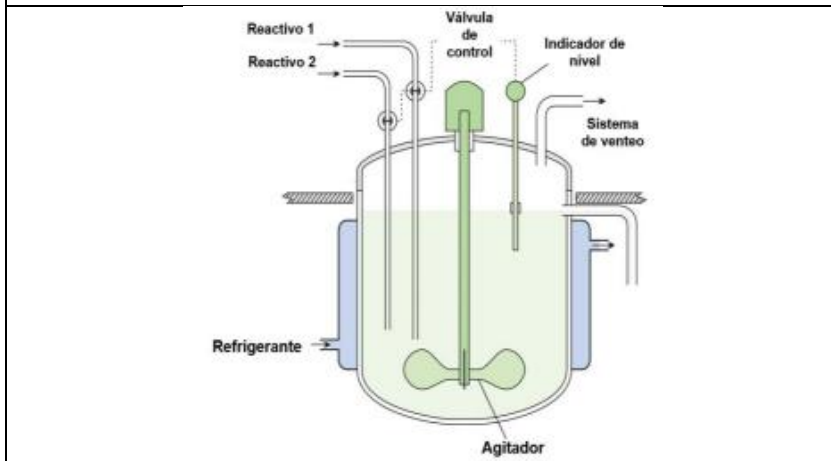
### Anexo A. Reactores Químicos



Reactor de tornillo



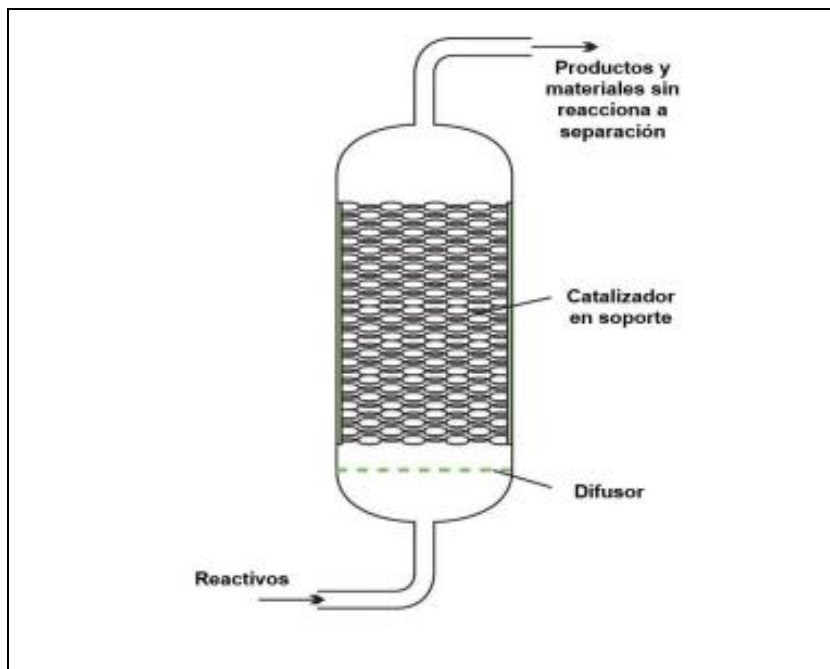
Reactor de extrusión



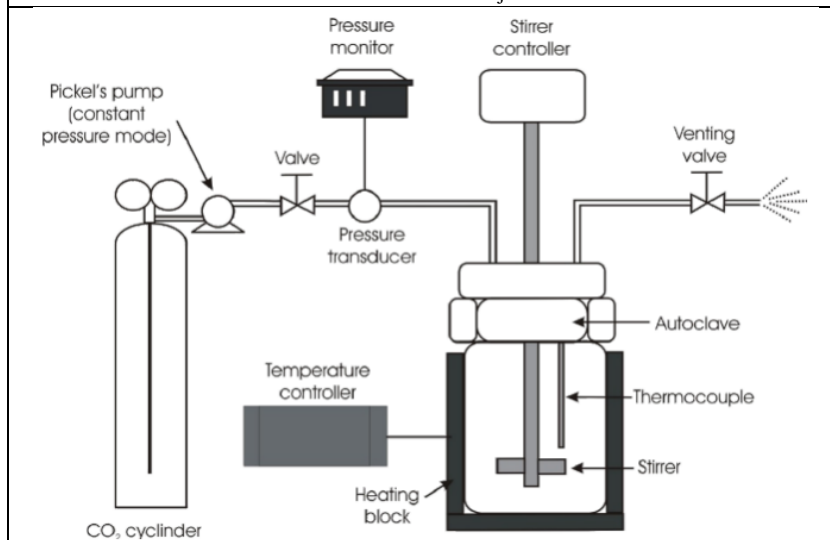
Reactor de tanque agitado

NOTAS:	CATEGORIA DEL DIAGRAMA:	<div>ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA ELABORADO POR: Oscar Pinajota</div>	Reactores químicos		
	<div><div><input type="checkbox"/> Aprobado</div><div><input type="checkbox"/> Certificado</div><div><input type="checkbox"/> Información</div></div> <div><div><input type="checkbox"/> Preliminar</div><div><input type="checkbox"/> Por aprobar</div><div><input checked="" type="checkbox"/> Por calificar</div></div>		LÁM	ESC	FECHA
			1	1:1	2018/05/22

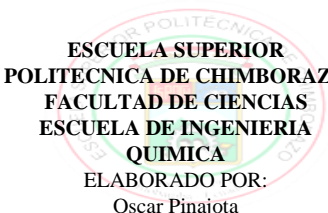
## Anexo B. Reactores Químicos



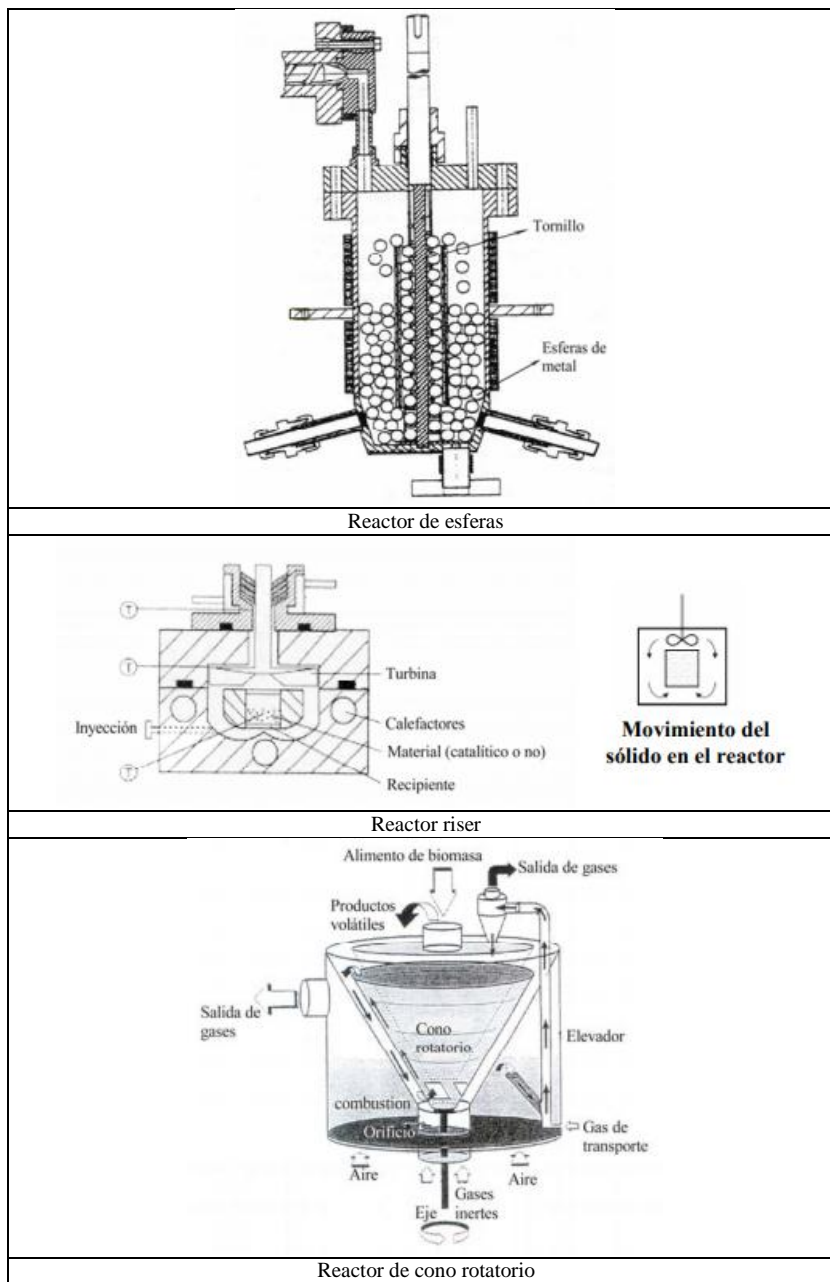
Reactor de lecho fijo




Reactor de autoclave

NOTAS:	CATEGORIA DEL DIAGRAMA:	<div style="text-align: center;">  <p> <b>ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO</b>  <b>FACULTAD DE CIENCIAS</b>  <b>ESCUELA DE INGENIERIA</b>  <b>QUIMICA</b>  ELABORADO POR:  Oscar Pinajota </p> </div>	Reactores químicos		
	<input type="checkbox"/> Aprobado <input type="checkbox"/> Preliminar <input type="checkbox"/> Certificado <input type="checkbox"/> Por aprobar <input type="checkbox"/> Información <input checked="" type="checkbox"/> Por calificar		LÁM	ESC	FECHA
			2	1:1	2018/05/22

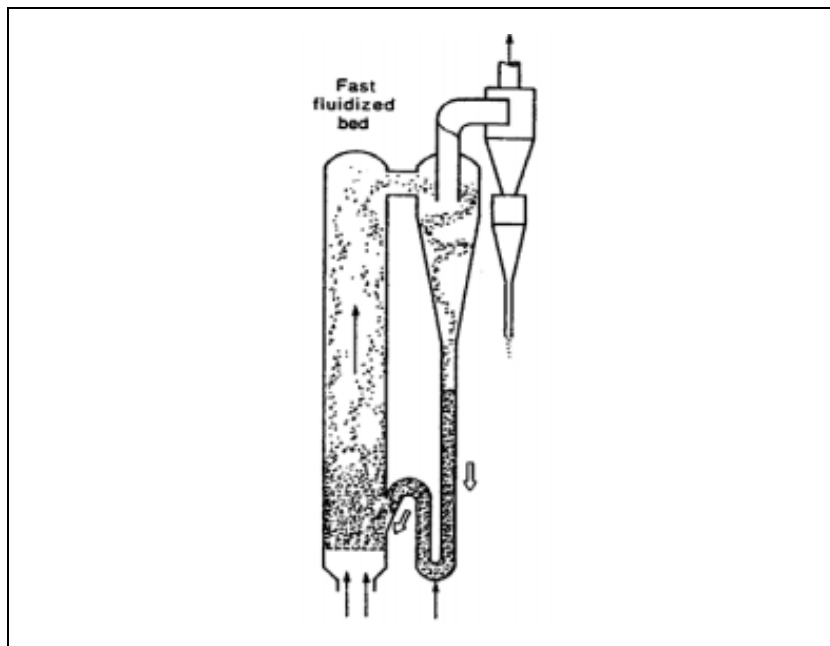
## Anexo C. Reactores Químicos



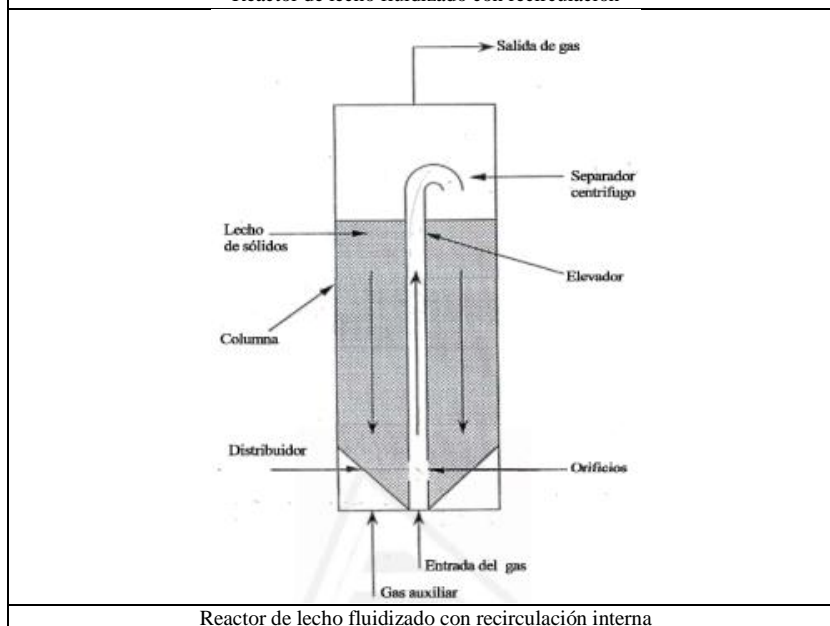
NOTAS:	CATEGORIA DEL DIAGRAMA:	<div><p><b>ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO</b> <b>FACULTAD DE CIENCIAS</b> <b>ESCUELA DE INGENIERIA</b> <b>QUIMICA</b> ELABORADO POR: Oscar Pinajota</p></div>	Reactores químicos		
	<div><div><input type="checkbox"/> Aprobado</div><div><input type="checkbox"/> Certificado</div><div><input type="checkbox"/> Información</div></div> <div><div><input type="checkbox"/> Preliminar</div><div><input type="checkbox"/> Por aprobar</div><div><input checked="" type="checkbox"/> Por calificar</div></div>		LÁM	ESC	FECHA
			3	1:1	2018/05/22



## Anexo D. Reactores Químicos



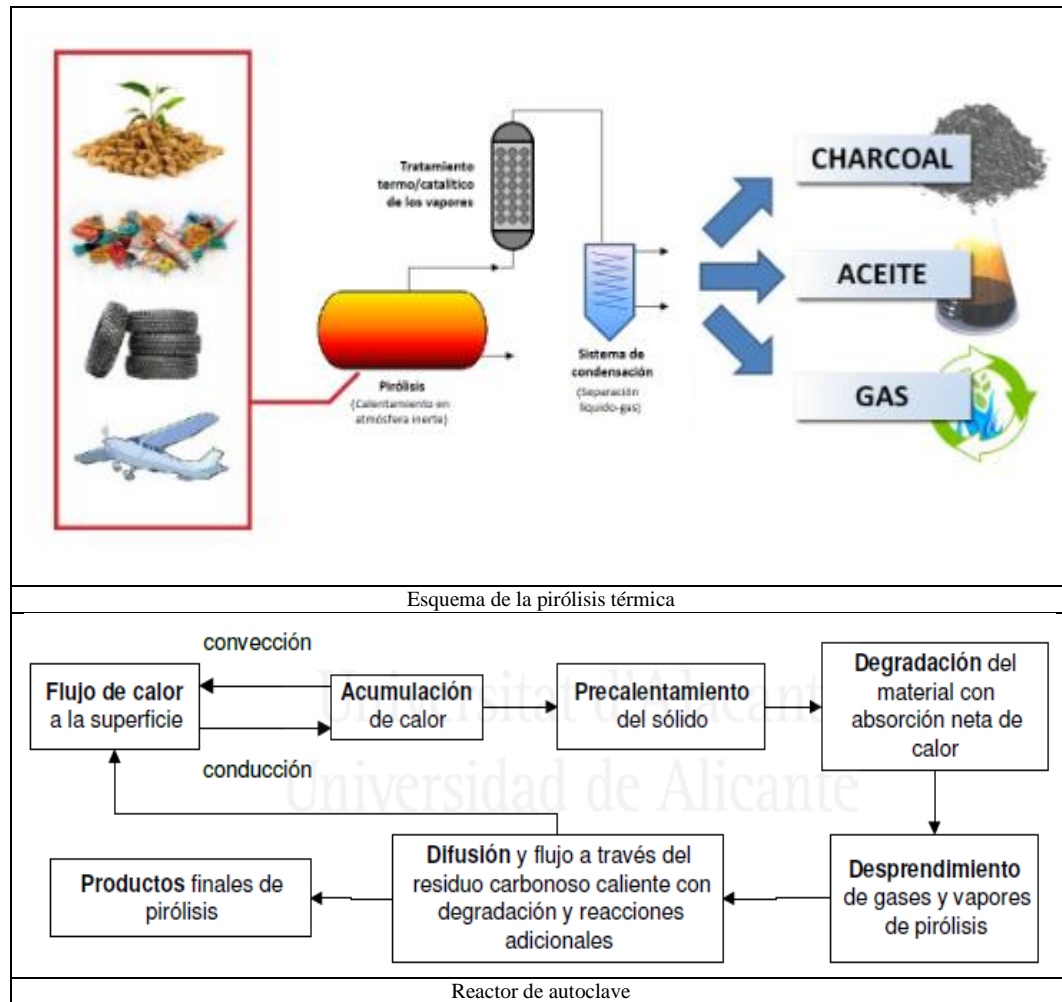
Reactor de lecho fluidizado con recirculación



Reactor de lecho fluidizado con recirculación interna

NOTAS:	CATEGORIA DEL DIAGRAMA:	<p style="text-align: center;"> <b>ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO</b>  <b>FACULTAD DE CIENCIAS</b>  <b>ESCUELA DE INGENIERIA</b>  <b>QUIMICA</b>  ELABORADO POR:  Oscar Pinajota </p>	Reactores químicos		
	<input type="checkbox"/> Aprobado <input type="checkbox"/> Preliminar <input type="checkbox"/> Certificado <input type="checkbox"/> Por aprobar <input type="checkbox"/> Información <input checked="" type="checkbox"/> Por calificar		LÁM	ESC	FECHA
			2	1:1	2018/05/22

## Anexo E. Esquema de la pirólisis Térmica



NOTAS:	CATEGORIA DEL DIAGRAMA:	<b>ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO</b> <b>FACULTAD DE CIENCIAS</b> <b>ESCUELA DE INGENIERIA</b> <b>QUIMICA</b> ELABORADO POR: Oscar Pinajota	Diagrama de la pirólisis térmica		
	<input type="checkbox"/> Aprobado <input type="checkbox"/> Preliminar <input type="checkbox"/> Certificado <input type="checkbox"/> Por aprobar <input type="checkbox"/> Información <input checked="" type="checkbox"/> Por calificar		LÁM	ESC	FECHA
			5	1:1	2018/05/22

## Anexo F. Polipropileno y poliestireno



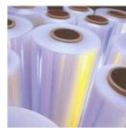
---

Polipropileno

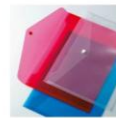


## Poliestireno

- Polietileno (PE)



- Polipropileno (PP)




- Policloruro de vinilo (PVC)



- Poliestireno (PS)



## Plásticos Termoestables

<b>NOTAS:</b>	<b>CATEGORIA DEL DIAGRAMA:</b>	 <p><b>ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO</b> <b>FACULTAD DE CIENCIAS</b> <b>ESCUELA DE INGENIERIA</b> <b>QUIMICA</b> ELABORADO POR: Oscar Pinajota</p>	Residuos plásticos de polipropileno y poliestireno		
<input type="checkbox"/> Aprobado <input type="checkbox"/> Preliminar <input type="checkbox"/> Certificado <input type="checkbox"/> Por aprobar <input type="checkbox"/> Información <input checked="" type="checkbox"/> Por calificar			<b>LÁM</b>	<b>ESC</b>	<b>FECHA</b>
			6	1:1	2018/05/22

**Anexo G.** Costo de implementación de un reactor Batch para la pirolisis térmica de polipropileno y poliestireno adaptado a las variables de mayor rendimiento teórico.



## **10kg Batch Tire Pyrolysis To Fuel Oil**

**Xinxiang City Jinzhen Machinery Manufacturing Co., Ltd..**

**Add : Henan,China**

**Email :alex@xxjzjx.com.cn**

**Tel: 0086 371 55679839**

**Mobile: 0086 13303710540**



## Xinxiang City Jinzhen Machinery Manufacturing Co., Ltd.

Add: Henan, China Email: [alex@xxzix.com.cn](mailto:alex@xxzix.com.cn)

Num.	Name	Parameter
1	Capacity	10kg
2	Raw material	Waste Tire/plastic
3	Heating method	Wood/coal & waste gas
4	Thickness of Reactor	14mm
5	Rotate speed of Reactor	0.4turn/minute
6	Model of cooling	Water cooling
7	Power(kw)	2
8	Land Area(m <sup>2</sup> )	5
9	Oil yield	45%-50%
10	Output Steel wire	10%-15%
11	Output Carbon black	30%-35%
12	Output Waste gas	10%-12%
13	Working method	Batch type
14	Workers	1
15	Control method	Central control system
16	Noise dB(A)	≤65
17	Dead weight(Ton)	1
18	Transport	Wooden packing
19	EXW price	US\$5680



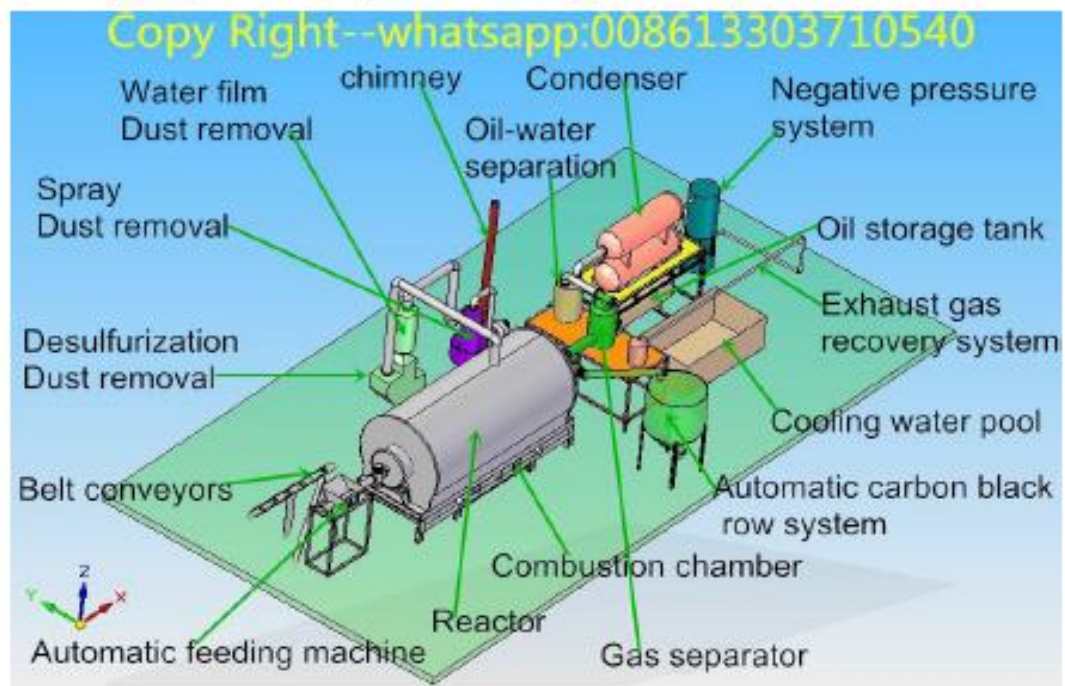
**Xinxiang City Jinzhen Machinery Manufacturing Co., Ltd.**

Add: Henan, China Email: [alex@xixix.com.cn](mailto:alex@xixix.com.cn)

Main parts for 10kg tyre/plastic pyrolysis machine:

Reactor	Central Control box
Condenser	Safety valve
Buffer tank	Pressure gauge
Oil tank	Thermometer
Safe water seal	Dust removal system
Exhaust gas recovery heating system	Precipitation tank
Fans	Chimney

Tire pyrolysis machine process drawing:







**Xinxiang City Jinzhen Machinery Manufacturing Co., Ltd.**

Add: Henan, China Email: [alex@xxjzjx.com.cn](mailto:alex@xxjzjx.com.cn)

### Notes:

1. Preheat and reactor tank are used 345R boiler plate material; condenser with 304 stainless steel.
2. Production cycle: 20 days.
3. Payment: 100% T/T in deposit.
4. We will supply to you user's manual in english.
6. Our Product are guaranteed by China People's Insurance Company .
  - 100% Payment protection;
  - 100% On-time shipment;
  - 100% Product quality protection

